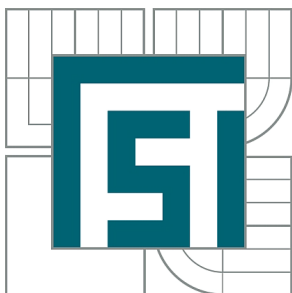


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ AERODYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK VOZIDLA NA ZÁKLADĚ JÍZDNÍCH TESTŮ

MEASUREMENT OF VEHICLE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS BASED ON DRIVING
TESTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTIN HORKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR PORTEŠ, Dr.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Horký

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření aerodynamických charakteristik vozidla na základě jízdních testů

v anglickém jazyce:

Measurement of vehicle aerodynamic characteristics based on driving tests

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Určení aerodynamických charakteristik vozidla na základě měřených veličin během jízdních testů.

Cíle diplomové práce:

Vypracujte a ověřte metodu pro měření aerodynamických charakteristik vozidla. Za tímto účelem navrhnete postup zkoušky, měřicí systém a způsob vyhodnocení měřených dat. Proved'te měření a výsledky analyzujte z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření.

Seznam odborné literatury:

KATZ, J. Race Car Aerodynamics. Race Car Aerodynamics. Robert Bentley 2006, ISBN-0-8376-0142-8.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vyhodnocováním aerodynamických vlastností vozidla na základě jízdních testů, konkrétně dojezdových zkoušek a zkoušek za konstantní rychlosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika, jízdní testy, dojezdová zkouška, vozidlo, jízdní odpory

ABSTRACT

This thesis deals with appraising aerodynamic characteristics of vehicle based on road testing, specifically on coastdown tests and straight-line tests.

KEYWORDS

aerodynamics, road testing, coastdown test, vehicle, road loads



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Horký, M. *Měření aerodynamických charakteristik vozidla na základě jízdních testů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Porteše, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28. května 2014

.....

Bc. Martin Horký



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat zejména vedoucímu práce Ing. Petru Portešovi, Dr. za cenné rady a připomínky při zhotovování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Luboru Zháňalovi za významnou pomoc při zpracování praktické části této práce.

V neposlední řadě bych chtěl též poděkovat rodině za všestrannou podporu a trpělivost během celé doby studia.



OBSAH

Úvod	10
1 Aerodynamika a základní pojmy	11
1.1 Aerodynamika	11
1.2 Proudnice, přilnuté a odtržené proudění	11
1.3 Vlastnosti tekutin	12
1.4 Laminární a turbulentní proudění	12
1.5 Reynoldsovo číslo	13
1.6 Mezní vrstva	14
1.7 Odtržení proudu vzduchu	15
1.8 Úplav	16
1.9 Bernoulliho rovnice	16
1.10 Pitotova trubice	17
2 Aerodynamika automobilu	18
2.1 Požadavky na tvar vozidla	18
2.2 Rozložení tlaku na povrchu vozidla	19
2.3 Tvarování karoserie	20
2.4 Obtékání kol automobilu	21
2.5 Proudění pod kapotou motoru, chladicí systém	23
2.6 Přídavné aerodynamické prvky	23
2.7 Další faktory ovlivňující aerodynamické vlastnosti vozidla	24
2.8 Soustava aerodynamických sil a momentů	25
3 Jízdní odpory	29
3.1 Valivý odpor	29
3.2 Odpor vzdušný (aerodynamický)	30
3.3 Odpor stoupání	30
3.4 Odpor zrychlení	31
3.5 Odpor přívěsu	32
4 Možnosti zjišťování aerodynamických vlastností vozidel	33
4.1 Jízdní testy vozidel	33
4.1.1 Měření vztlaku	33
4.1.2 Měření aerodynamického odporu	34
4.1.3 Měření rozložení tlaků na karoserii	35
4.1.4 Zviditelnění proudnic	36
4.2 Měření v aerodynamickém tunelu	36
4.2.1 Typy větrných tunelů	36



4.2.2	Velikost modelu, velikost testovacího úseku tunelu	37
4.2.3	Simulace pohybu vozovky	37
4.2.4	Metody umístění modelu v aerodynamickém tunelu	38
4.3	Výpočtové aerodynamické modelování.....	39
5	Jízdní testy	40
5.1	Provedené zkoušky	40
5.1.1	Zkušební vozidlo	41
5.1.2	Metodika měření.....	42
5.2	Nastavení vozidla.....	43
6	Zpracování naměřených dat.....	45
6.1	Dojezdová zkouška - porovnání metod zpracování dat	47
6.1.1	Závislost zrychlení na rychlosti	47
6.1.2	Závislost zatížení na rychlosti	52
6.2	Zkouška za konstantní rychlosti - porovnání dat	55
6.2.1	Korekce výsledků zkoušky za konstantní rychlosti pomocí GPS	55
6.2.2	Zhodnocení přesnosti určení zatížení jednotlivých kol	57
6.3	Celková závislost zatížení kol na rychlosti	58
6.4	Výpočty koeficientu aerodynamického odporu	60
6.5	Výpočty koeficientu aerodynamického vztlaku.....	63
6.5.1	Výpočet součinitelů vztlaku z koeficientů polynomů	63
6.5.2	Výpočtu součinitelů vztlaku přímo ze vztahu	65
6.6	Závislost vztlakové síly na vzdušné odporové síle	68
7	Vyhodnocení získaných výsledků	70
7.1	Porovnání jednotlivých nastavení vozu	70
7.1.1	Vliv nastavení aerodynamických prvků	70
7.1.2	Vliv výšky vozidla.....	75
7.1.3	Vliv difuzoru	80
7.2	Zhodnocení z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření.....	83
	Závěr.....	84
	Seznam použitých zkratk a symbolů	87
	Seznam příloh	90



ÚVOD

Již od dob počátku automobilismu bylo věnováno velké úsilí snaze dosáhnout stále vyšších rychlostí. Se vzrůstající rychlostí jízdy se zvětšuje účinek aerodynamického působení na vozidlo, a proto již od těchto raných dob automobilismu byla snaha konstruktérů uzpůsobit tvarování karoserie tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností automobilu. Tvarování automobilu má velmi komplexní vliv na vlastnosti vozidla - ovlivňuje stabilitu a ovladatelnost (zejména při vyšších rychlostech), maximální rychlost, které je automobil schopen dosáhnout, brzdný výkon a v neposlední řadě i spotřebu paliva. V současné době je ze strany výrobců vozidel vyvíjeno velké úsilí při zkoumání aerodynamických účinků na vozidlo a doladění tvaru vozidla pro dosažení co nejlepšího kompromisu mezi jednotlivými a často protichůdnými požadavky na vozidlo, např. kompromis mezi stabilitou a dobrou ovladatelností ve vysokých rychlostech a nízkou spotřebou a emisemi škodlivin.

Zkoumání aerodynamických vlastností vozidel je prováděno několika způsoby. Při vývoji nového vozidla jsou prováděny počítačové simulace, jež jsou pro výrobce automobilů výhodné zejména nízkou časovou a finanční náročností. Další, avšak finančně náročnější metodou, je zkoumání vlastností ve větrném tunelu, které je výrobcí vozidel používáno k ověření správnosti výsledů počítačových simulací. Další možnosti jsou jízdní testy, které jsou výhodnou metodou, pokud je potřeba určit aerodynamické charakteristiky již existujícího vozidla, ke kterému je obtížné získat podklady pro provedení počítačových simulací. Právě tyto jízdní testy jsou náplní této diplomové práce.

Cílem práce je navrhnout a zpracovat metodu pro měření aerodynamických charakteristik vozidla a zanalyzovat výsledky této metody z hlediska přesnosti a opakovatelnosti měření. V této práci jsou zpracována data naměřená v listopadu 2011 na závodním voze týmu Chabř Motorsport za účelem porovnat vliv jednotlivých aerodynamických prvků vozidla na jeho vlastnosti.



1 AERODYNAMIKA A ZÁKLADNÍ POJMY

V této kapitole budou objasněny základní pojmy a principy aerodynamiky.

1.1 AERODYNAMIKA

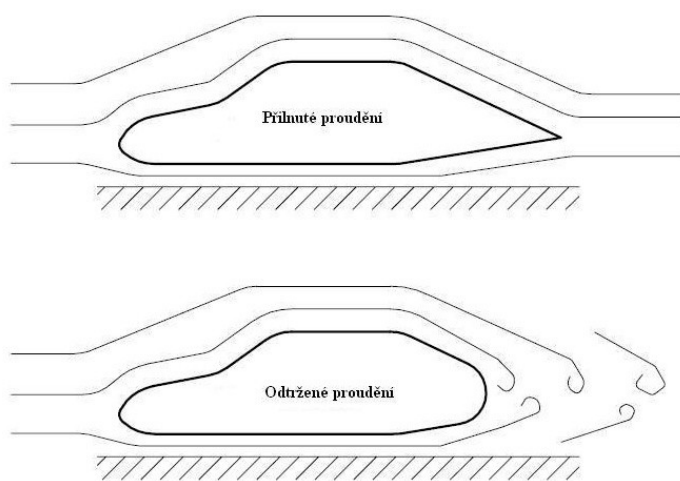
Aerodynamika je částí fyziky, přesněji mechaniky, která zkoumá silové působení na těleso obtékané proudem vzduchu. Tento obor nachází uplatnění zejména při konstrukci dopravních prostředků, ať jsou to letadla, automobily, vlaky, či lodě. [1]

1.2 PROUDNICE, PŘILNUTÉ A ODRŽENÉ PROUDĚNÍ

Částička vzduchu procházející nějakým bodem před vozidlem bude pokračovat v trajektorii, kterou nazýváme proudnicí. Za předpokladu konstantní rychlosti bude trajektorie pohybu další částičky procházející tímž bodem totožná s trajektorií (proudnicí) dřívější částičky. Soubor proudnic vytváří obraz obtékání automobilu. Zviditelnění proudnic může být provedeno pomocí vstřikování částic kouře do proudícího vzduchu. Pokud má vstřikovaný kouř rozdílnou hustotu oproti proudícímu vzduchu, nemusí se částička kouře dostatečně přesně pohybovat po proudnici a může dojít k odchylkám částiček kouře od trajektorie, po které se pohybují částičky vzduchu. Proto je v aerodynamických tunelech používán kouř s vlastnostmi velmi podobnými vzduchu. [2] [3]

Pokud proudnice nacházející se v blízkosti pevného povrchu (například karoserie vozidla) přesně opisuje tvar tohoto povrchu, pak se jedná o proudění přilnuté. Přilnuté proudění je velmi důležité pro zmenšení aerodynamického odporu.

Pokud proudnice nacházející se v blízkosti pevného povrchu neopisuje tvar tohoto povrchu, pak se jedná o proudění odtržené. Odtržené proudění vzniká nejčastěji v zadní části vozidla, v místě, kde se odtrhává mezní vrstva. [2]



Obr. 1 Přilnuté a odtržené proudění - schematický model automobilu [4]

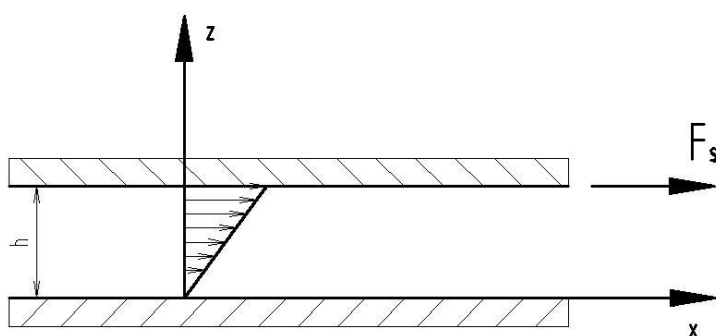


1.3 VLASTNOSTI TEKUTIN

Síla potřebná k pohybu předmětu v tekutině (vozidla skrz vzduch) závisí na fyzikálních vlastnostech tekutiny, zejména na tlaku, teplotě, hustotě a viskozitě.

Hustota (hmotnost/jednotka objemu) při standardních atmosférických podmínkách a v nulové nadmořské výšce pro vzduch nabývá hodnoty $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$. Obvykle se neuvažují velké změny hustoty vzduchu, je však třeba počítat s velkým rozptylem teplot, ve kterých se může automobil vyskytnout. Hustota vzduchu též závisí na nadmořské výšce. [3]

Viskozitu tekutiny lze obecně definovat jako míru odporu tekutiny proti pohybu (vnitřní tření v tekutině). Vliv viskozity na tekutiny může být znázorněn na pokusu se dvěma navzájem se pohybujícími deskami, mezi kterými je prostor zcela vyplněn viskózní tekutinou. Spodní povrch je v klidu, zatímco horní povrch se pohybuje směrem doprava konstantní rychlostí. Částičky tekutiny v bezprostřední blízkosti obou povrchů mají tendenci ulpívat na površích desek a mají tedy nulovou relativní rychlost vzhledem k jednotlivým deskám. Vlivem pohybu horní desky vůči spodní a uplívání částic na površích jsou jednotlivé molekuly tekutiny nuceny se vůči sobě pohybovat. Velikost rychlosti proudění mezi deskami se tedy lineárně zvětšuje z nulové hodnoty (spodní deska) do velikosti rychlosti povrchu horní desky. [2]



Obr. 2 Rozložení rychlosti proudění mezi dvěma pohybujícími se deskami [4]

Odolnost tekutiny proti pohybu se projevuje jako smykové napětí v tekutině, které je nutno překonat, aby došlo k pohybu tělesa umístěného v dané tekutině. Velikost smykové síly F_s je dána rovnicí:

$$\frac{F_s}{A} = \mu \frac{V_\infty}{h} \quad (1)$$

kde A je povrch horní desky, μ je dynamická viskozita, V_∞ je rychlost volného proudu a h je vzdálenost mezi deskami. [4]

Velikost viskozity závisí na teplotě a tlaku. Při nulové nadmořské výšce a teplotě 20°C je viskozita vzduchu $\mu = 1,78 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. [3]

1.4 LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Laminární proudění je takové proudění viskózní tekutiny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nekříží se. Částičky tekutiny se pohybují ve vrstvách, které se vzájemně



nepromíchávají. Mezi jednotlivými vrstvami laminárně proudící tekutiny je předpokládána existence vnitřního tření. K laminárnímu proudění obvykle dochází při nižších rychlostech proudění. [5]

Turbulentní proudění je takové proudění viskózní tekutiny, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Částičky tekutiny konají při proudění kromě posuvného pohybu i složitý vlastní pohyb, který má za následek vznik víření. Rychlosti jednotlivých částí tekutiny se nepravidelně mění. K turbulentnímu proudění dochází obvykle při vyšších rychlostech proudění. [6]

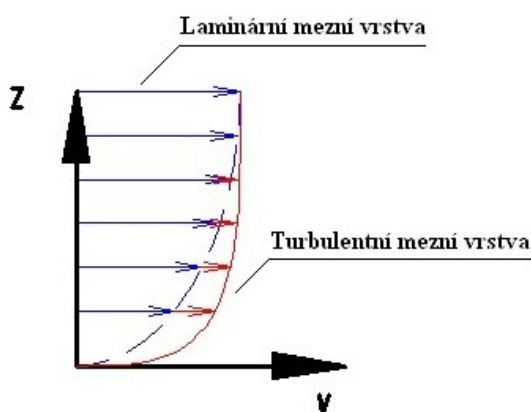
1.5 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, jejíž pomocí lze určit, zda je proudění tekutiny laminární nebo turbulentní. Reynoldsovo číslo je definováno vztahem:

$$Re = \frac{V * l}{\nu} \quad (2)$$

kde V je rychlost proudění, ν je kinematická viskozita a l je charakteristický rozměr - u automobilů obvykle rozvor nebo průměr fiktivního kruhu, jehož obsah je roven největší čelní ploše vozidla.

Vzhledem k rozměrům vozidel dochází při jejich obtékání vždy k turbulentnímu proudění. [3] [7]



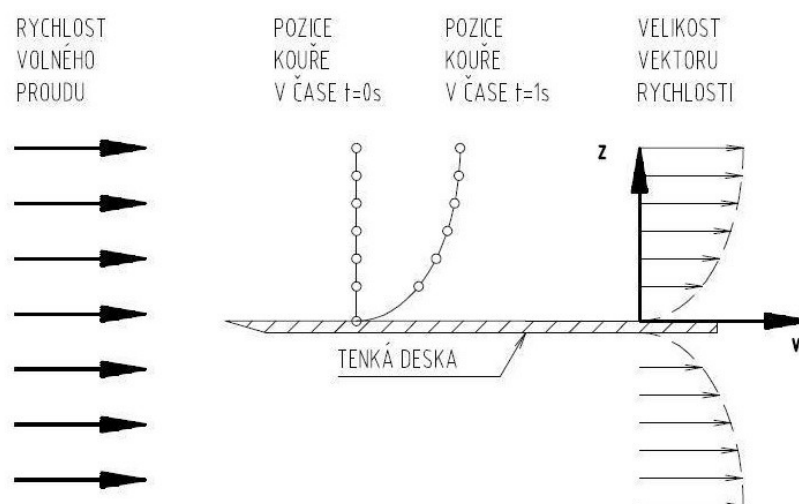
Obr. 3 Rychlostní profil v mezní vrstvě laminárního a turbulentního proudění [4]

Pro jednu hodnotu Reynoldsova čísla je možné proudění jak laminární, tak turbulentní. Povaha proudění v blízkém okolí povrchu obtékaného tělesa významně závisí na neklidnosti proudění a drsnosti obtékaného povrchu. [2]



1.6 MEZNÍ VRSTVA

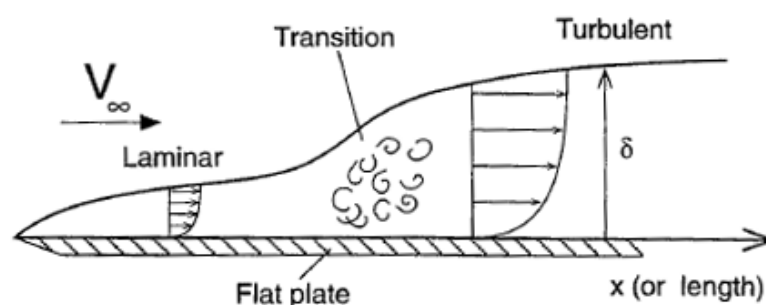
Pokud se vozidlo pohybuje klidným vzduchem, potom jeho tvar ovlivňuje pohyb jednotlivých částeczek vzduchu tak, že rychlosti těchto částeczek nejsou stejné. Tento jev lze ilustrovat na příkladu tenké desky vložené do proudu vzduchu paralelně s proudnicemi. [2]



Obr. 4 Rychlostní profil v mezní vrstvě - tenká deska vložená v proudu vzduchu [4]

Velikost relativní rychlosti mezi deskou a proudícím vzduchem na povrchu desky je nulová. S narůstající vzdáleností od povrchu desky se rychlost zvyšuje, až v určité vzdálenosti od povrchu dosáhne rychlosti volného proudění. Tato tenká vrstva se nazývá mezní vrstva. Například pro vozidlo pohybující se rychlostí 100 km/h je tloušťka vrstvy v rozmezí několika milimetrů (na přední vozidla) až několika centimetrů (na střeše vozidla). [2]

Dle způsobu jakým se mění rychlostní spád uvnitř mezní vrstvy, rozlišujeme mezní vrstvu laminární a turbulentní. V místě začátku obtékání tělesa je obvykle mezní vrstva laminární, posléze může přecházet na turbulentní. Tento jev je schematicky znázorněn na příkladu tenké desky, kde na začátku desky je proudění laminární, ale jak se lokální vzdálenost od začátku desky (a s ní i lokální Reynoldsovo číslo) zvyšuje, proudění okolo desky se stává turbulentním. Kvůli proměnlivé rychlosti částeczek turbulentního proudění je turbulentní mezní vrstva silnější než laminární, s větším smykovým třením, tím pádem způsobuje větší aerodynamický odpor. [2] [3]



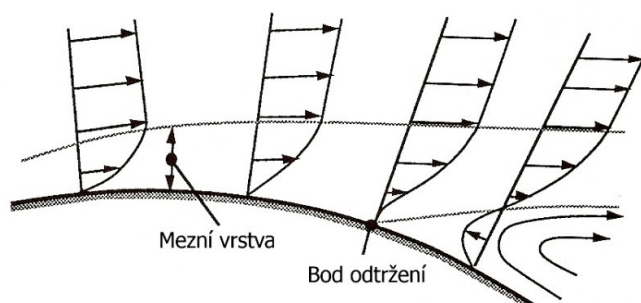
Obr. 5 Varianty mezní vrstvy na tenké desce [2]



1.7 ODTRŽENÍ PROUDU VZDUCHU

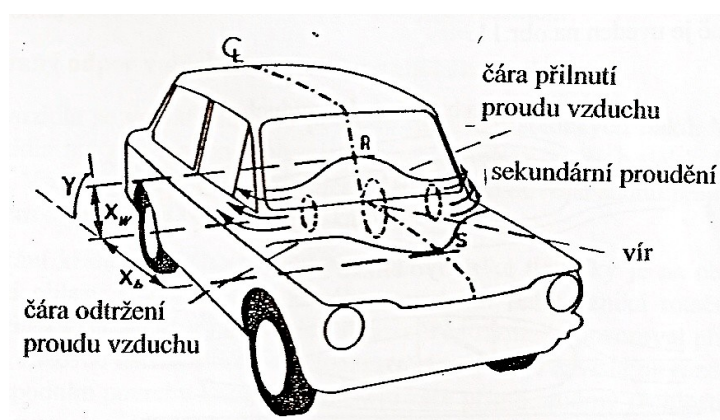
V důsledku proudění vzduchu okolo tělesa dochází ke změnám velikosti tlaku na povrchu tohoto tělesa. Pokud rozložení tlaků na povrchu působí tak, že tlačí vzduch kolem mezní vrstvy, tloušťka mezní vrstvy se nezvětšuje. Zmenšování velikosti tlaku ve směru proudění je příznivé rozložení tlaku, protože zabraňuje zvětšování tloušťky mezní vrstvy. Pokud se proudění stáčí k povrchu, narůstá tlak. Nárůst tlaku má za následek zpomalení proudění v mezní vrstvě, což vede ke zvětšení tloušťky mezní vrstvy. Tento jev bývá označován jako nepříznivé rozložení tlaku.

V určitém bodě se proudění v blízkosti povrchu může otočit v důsledku působení tlaku. Proudění za tímto bodem odtržení již není přilnuté a pokračuje dále obvykle ve směru proudění. Protože toto proudění má tendence strhávat s sebou vzduch za tělesem, tlak v této oblasti klesá pod úroveň okolního tlaku a vznikají zde nepravidelné víry. [8]



Obr. 6 Odtržení proudu vzduchu [8]

Typickým příkladem odtržení proudu vzduchu je případ, kdy se laminární mezní vrstva proudící po kapotě automobilu v důsledku velkého zakřivení povrchu (typicky přechod mezi kapotou a čelním sklem) odtrhne a posléze znovu přilne. Přilnutí je obvykle výsledkem přeměny mezní vrstvy z laminární na turbulentní, způsobené narušením proudění odtržením mezní vrstvy. Díky větším přesunům hybnosti v turbulentní vrstvě dochází ke znovupřilnutí mezní vrstvy a pozdějšímu odtržení mezní vrstvy ve srovnání s laminární mezní vrstvou. Vzniká tak „odtržená bublina“. [2] [3]



Obr. 7 Odtržení proudu vzduchu na rozhraní kapoty a čelního skla [3]

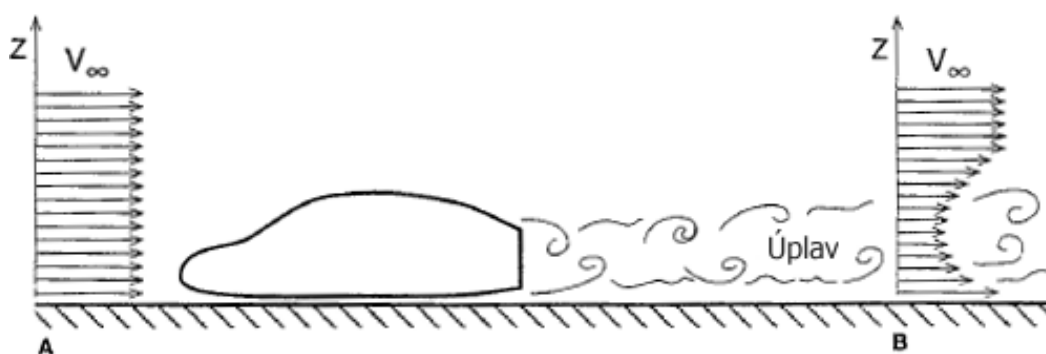
„Odtržená bublina“ se sekundárním prouděním (víry uvnitř „odtržené bubliny“ se pohybují do stran a pokračují dále po bocích karoserie) je poměrně citlivá a může docházet k odtržení bez



znovupřilnutí a tím pádem i ke zvětšení aerodynamického odporu. Takovéto „odtržené bubliny“ mohou zmizet s nárůstem rychlosti proudění. [2] [3]

1.8 ÚPLAV

Pro určování aerodynamických vlastností tělesa není důležité pouze obtékání okolo daného tělesa, ale též účinky obtékání tohoto tělesa za ním. Úplav je neklidné proudění za objektem umístěným do jinak klidného proudění. Příkladem úplavu mohou být oblaka prachu za nákladním automobilem, které se otáčí i dlouho po jeho průjezdu. Měříme-li rozložení rychlosti proudění po výšce před vozidlem (vzdálenost větší než několik metrů), bude rozložení rychlosti po výšce konstantní. Provedeme-li stejné měření za vozidlem, dokonce i ve větší vzdálenosti (několik desítek metrů), zjistíme úbytek velikosti rychlosti v určitých výškách. V oblasti úplavu je proudění jakoby taženo za vozidlem, což způsobuje odpor proti pohybu, úplav způsobuje zhruba třetinu celkového aerodynamického odporu vozidla. [2] [8]



Obr. 8 Úplav - rozložení rychlostí proudění před a za vozidlem [2]

Protože proudění uvnitř úplavu se pohybuje ve směru pohybu vozidla, další vozidlo jedoucí těsně za prvním může využít této oblasti odtrženého proudění, kde mu prostředí neklade takový odpor jako prvním vozidlu. Tento efekt má využití zejména v motorsportu. Důležitým aspektem úplavu je jeho časová proměnnost a periodicitu, kterou je možné demonstrovat na příkladu vzniku jednotlivých po sobě jdoucích vírů vznikajících za nákladním automobilem. [2]

1.9 BERNOULLIHO ROVNICE

Tvar pohybujícího se vozidla způsobuje změnu směru a velikosti rychlosti proudění, což vede ke vzniku aerodynamického zatížení působícího na karoserii vozidla. Toto zatížení lze rozdělit na zatížení od mezní vrstvy, které působí ve směru tečny na povrch a způsobuje aerodynamický odpor, a tlak, který působí ve směru normály na povrch a způsobuje jak aerodynamický odpor, tak vztlak. Tento tlak je způsoben zejména rychlostí proudění vně mezní vrstvy (velikost rychlosti v mezní vrstvě na povrchu vozidla je nulová). [2]

Aerodynamické zatížení je závislé na rychlosti proudění v blízkosti povrchu obtékaného tělesa, tato rychlost souvisí s velikostí tlaku na povrchu. Bernoulliho rovnice popisuje vztah mezi rychlostí proudění a tlakem:



$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = konst. \quad (3)$$

kde p je statický tlak, V je rychlost proudění a ρ je hustota proudící tekutiny. [2]

Bernoulliho rovnice slouží k porovnávání rychlostí a tlaků ve dvou různých bodech jednodimenzionálního proudění (body 1 a 2). Jedná-li se o spojitě proudění s konstantní hustotou proudící tekutiny, je možné Bernoulliho rovnici použít v kterémkoli bodě proudění.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} \quad (4)$$

Z Bernoulliho rovnice například vyplývá, že k vytvoření přitlačné síly na vozidlo je třeba zajistit, aby rychlost proudění na spodní straně vozidla byla větší než rychlost proudění na horní straně vozidla, což bude mít za následek nižší tlak na spodní straně vozidla, což povede ke vzniku přitlačné síly. [2]

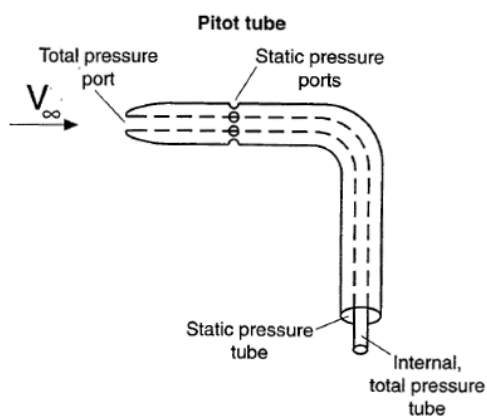
1.10 PITOTOVA TRUBICE

Základní Pitotova trubice je složena ze dvou soustředných trubic. Na bocích vodorovné části vnější trubice jsou vstupy pro statický tlak - tlak měřitelný též v klidném prostředí. Dalším tlakem je tlak totální, který je přiváděn do vnitřní trubice otvorem v přední špičce Pitotovy trubice. Na základě Bernoulliho rovnice můžeme odvodit vztah:

$$p_{tot} - p_{\infty} = \frac{\rho}{2} V_{\infty}^2 \quad (5)$$

kde p_{tot} je totální tlak a p_{∞} je statický tlak.

Z rozdílu tlaku mezi oběma trubicemi a hustoty proudící tekutiny lze zjistit rychlost volného proudění (nebo rychlost vozidla). Pro zachování přesnosti měření je velmi vhodné, aby Pitotova trubice byla umístěna nejlépe v místě s laminárním prouděním. Někdy bývá člen rovnice $\rho/2 * V_{\infty}^2$ nazýván dynamickým tlakem. Potom lze říci, že tlak totální je roven součtu tlaku statického a dynamického. [2]



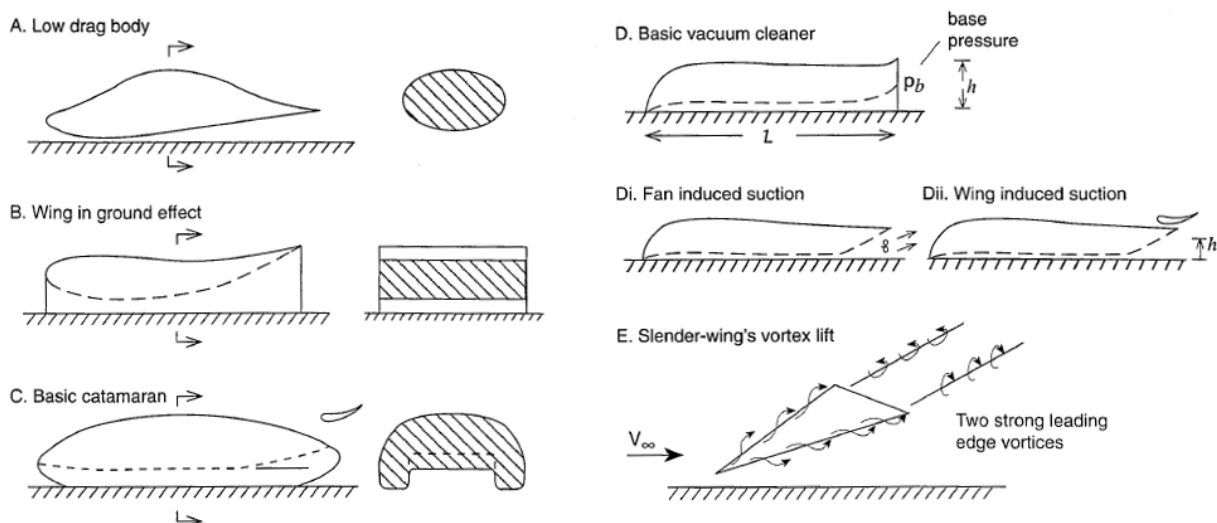
Obr. 9 Pitotova trubice [2]

2 AERODYNAMIKA AUTOMOBILU

2.1 POŽADAVKY NA TVAR VOZIDLA

Požadavky na tvar karoserie produkčních a závodních automobilů se poměrně liší. U produkčních automobilů je z hlediska aerodynamiky kladen požadavek zejména na nízký aerodynamický odpor, a to kvůli zvýšení hospodárnosti vozidel, dále na optimalizaci proudění okolo karoserie tak, aby například nedocházelo ke špinění oken, zrcátek a světlometů, nebo aby se za deště voda setřená stěračem nevracela zpět na setřenou plochu skla. U produkčních automobilů schopných dosahovat vysokých rychlostí je též kladen důraz na co nejmenší vztlak a jeho vhodné rozložení mezi přední a zadní nápravu. Působí-li například při vyšších rychlostech na za nízkých rychlostí jinak nedotáčivé vozidlo s nevhodně tvarovanou karoserií, která má za následek malý vztlak na přední nápravě a naopak velký vztlak na zadní nápravě, dochází k odlehčování zadní nápravy, tím pádem ke zmenšení schopnosti pneumatiky přenášet síly na vozovku, což má za následek zhoršení ovladatelnosti a sklony k přetáčivému chování vozidla. Chování takového vozidla je pro řidiče těžko předvídatelné a vozidlo se stává potenciálně nebezpečným. Nedílnou součástí aerodynamiky produkčních vozidel je též aerodynamika vnitřního prostoru kabiny optimalizující například proudění ohřátého vzduchu na sklo za účelem odmlžování, či optimalizace proudění vzduchu v kabině za účelem zvýšení komfortu posádky.

U závodních automobilů je kladen důraz na to, aby byl automobil schopen pohybovat se co možná nejvyšší rychlostí po silnici nebo na závodním okruhu. Pro pohyb v přímém směru je ideální, aby automobil generoval minimální aerodynamický odpor. Pro zatáčení, brzdění či akceleraci vysokovýkonných vozů je třeba, aby pneumatiky byly schopny přenést co největší boční či podélné síly. Zvětšení těchto sil je možné dvěma způsoby - zvětšením přilnavosti pneumatiky nebo zvětšením síly, která přitlačuje pneumatiku k zemi. Tuto sílu můžeme zvýšit zvětšením hmotnosti automobilu, což je značně kontraproduktivní, neboť tím se úměrně zvedá setrvačnost vozidla, což vede k tomu, že pneumatika musí přenášet větší podélné a boční síly.



Obr. 10 Základní koncepty tvarů (stavební bloky) pro navrhování aerodynamiky závodního vozu [2]

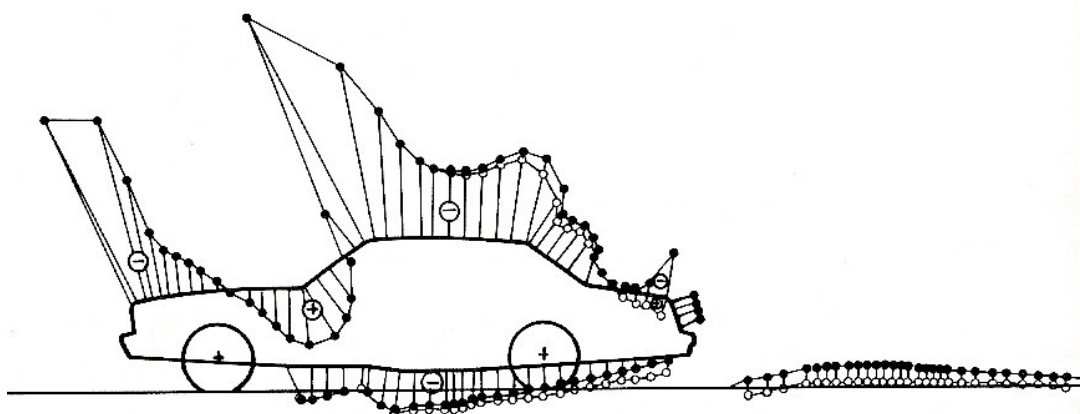


Řešením, jak zvýšit zatížení pneumatiky a zároveň nezvyšovat hmotnost vozidla, je „vzít“ toto zatížení ze vzduchu. Pomocí vhodného tvarování karoserie lze docílit aerodynamického přítlaku, díky němuž se zvětší zatížení kol, aniž by vzrůstala setrvačnost vozidla. Tvarování karoserie tak, aby generovala co možná největší přítlak, má za následek zvětšení aerodynamického odporu. Závodní automobily většinou mají dostatečně velký výkon, aby přínos vyššího přítlaku, a tedy schopnosti projíždět zatáčky vyšší rychlostí, byl větší než ztráty rychlosti způsobené větším odporem. [2]

U závodních automobilů zejména formulového typu není z podstaty možné pouze tvarem karoserie dosáhnout potřebného přítlaku, proto bývá tento druh závodních vozidel osazován přídatnými křídly (předními či zadními), které mají za úkol přítlak zvyšovat. [2]

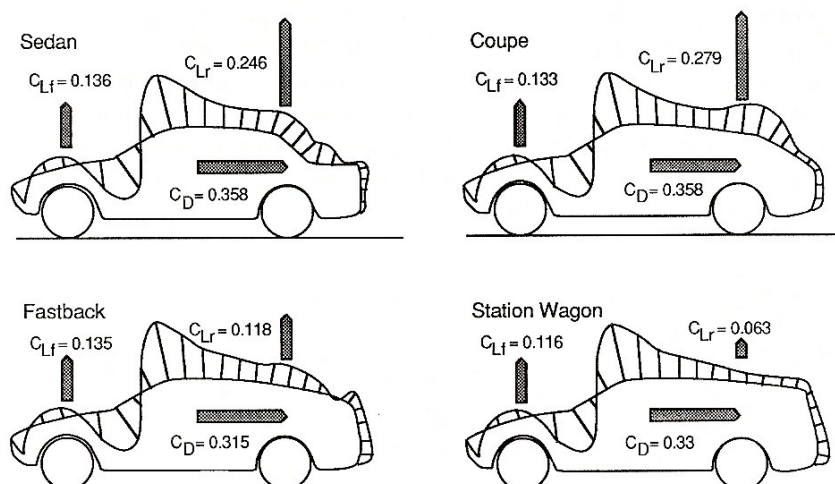
2.2 ROZLOŽENÍ TLAKU NA POVRCHU VOZIDLA

Tlak na povrchu vozidla bývá označován jako kladný (vyšší) či záporný (nižší) vůči okolnímu tlaku měřenému ve větší vzdálenosti od vozidla. Záporný tlak vzniká na předním okraji kapoty tak, že proudění zvedající se okolo přední části vozidla se pokouší otočit do směru kapoty. Toto nepříznivé rozložení tlaku může způsobit zpomalení proudění v mezní vrstvě a tím i nárůst aerodynamického odporu. V oblasti horního konce kapoty a spodní části čelního skla je proudění otáčeno směrem vzhůru, což způsobuje kladný tlak v této oblasti. Díky vyššímu tlaku je tato oblast vhodná pro umístění sání motoru či vstupu vzduchu pro topení a klimatizaci. V oblasti střechy opět převládá negativní tlak způsobený snahou proudění následovat tvarování střechy a zádě vozidla. V této oblasti dochází k odtržení proudění. Volba velikosti úhlů mezi střechou a zadním oknem, střechou a víkem zavazadlového prostoru má velký dopad na aerodynamické síly skrz ovlivnění bodu odtržení. Obecně lze říci, že čím menší plocha za bodem odtržení, tím menší aerodynamický odpor. Teoreticky nejlepším tvarem zádi vozidla je tedy kapkovitý tvar. [8]



Obr. 11 Rozložení tlaku na povrchu vozidla v podélné ose vozidla (+ kladný tlak, - záporný tlak) [8]

Zatímco velikost plochy odtrženého proudění má přímý vliv na aerodynamický odpor, míra, kterou je proudění strháváno za vozidlem směrem dolů, má vliv na aerodynamický vztlak na zadní nápravě. Zmenšení velikosti plochy odtrženého proudění obecně ústí ve zvětšení aerodynamického vztlaku na zadní nápravě, a to kvůli snížení tlaku způsobenému tlačení proudů vzduchu směrem dolů. [8]



Obr. 12 Rozložení tlaku a velikost aerodynamických koeficientů pro různé typy karoserie [8]

2.3 TVAROVÁNÍ KAROSERIE

PŘEDNÍ ČÁST VOZIDLA

Aerodynamický odpor přední části vozidla je ovlivněn tvarováním přední části vozidla a úhlem mezi kapotou a čelním sklem. Obecně lze konstatovat, že „zaoblenost“ přední části určuje oblast, ve které může působící tlak vyvolat aerodynamický odpor. Správným zaoblením a nízkým umístěním kapoty lze docílit nízkého aerodynamického odporu. Podstatná je též poloha neutrální čáry, kde se proudění rozděluje na proudění okolo horní části vozidla a proudění okolo spodní části vozidla. Minimálního aerodynamického odporu je dosaženo, když se neutrální čára nachází nízko. V případě aerodynamického vztlaku má zvýšení neutrální čáry za následek zvýšení rychlosti proudu pod vozidlem a tím i snížení výsledné vztlakové síly. Na straně druhé, nižší poloha neutrální čáry umožní vytvoření ploché, dopředu se sklánějící kapoty, což přispěje ke snížení tlaků na pomezí přední kapoty a čelního skla a tím i ke snížení aerodynamického vztlaku. [3] [8]

OBLAST PŘECHODU KAPOTY A ČELNÍHO SKLA

Oblast předního skla určuje směr proudění kolem horizontálně umístěné střechy. Malé úhly mezi čelním sklem a střešou vedou ke snížení aerodynamického odporu, avšak přináší s sebou nevýhody v podobě zvýšení vyhřívání vozidla slunečním zářením, zkreslování řidičova výhledu a zvýšení aerodynamického namáhání stěračů v důsledku rychlejšího proudění v této oblasti. [8]

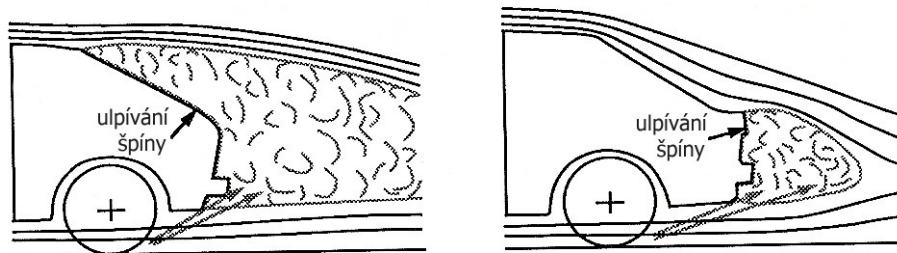
ZADNÍ ČÁST KAROSERIE

Největší podíl na aerodynamickém odporu karoserie má odtržené proudění a úplav vznikající za vozidlem. Velikost aerodynamického odporu je závislá na úhlu mezi rovinou střechy a



zadního skla (ideální je úhel okolo 15°), a vzdálenosti mezi horní hranou zadního skla a koncem vozidla, kde obecně platí, že čím větší je tato vzdálenost, tím menší je aerodynamický odpor. [8]

Dalším kritériem designu zadní části vozidla z hlediska aerodynamiky je možnost uplívání špíny na zadním skle a světlometech. Turbulence v oblasti odtrženého proudění do sebe vtahují vlhkost a špínu z vozovky rozvířenou odvalujícími se koly. Pokud se v zóně odtrženého proudění nachází světlomety či zadní sklo, dojde na nich k ulpívání špíny a zhoršení viditelnosti. [8]



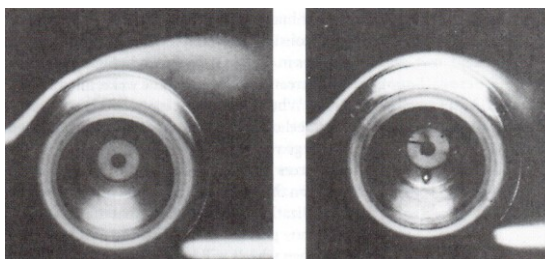
Obr. 13 Vliv bodu odtržení na špinění zadní části vozidla[8]

SPODNÍ ČÁST VOZIDLA

Spodní část vozidla je kritická oblast pro vznik aerodynamického odporu. Zavěšení, výfukový systém a další vystupující části podvozku mají za následek vznik aerodynamického odporu. Proudění v této oblasti je určeno nepohybujícím se vzduchem na povrchu silnice a proudem vzduchu strhávaným vystupujícími částmi podvozku. Snížení aerodynamického odporu v této oblasti může být dosaženo pomocí zakrytování podvozku hladkými panely. U řady závodních vozů je též použito speciálního tvarování spodní části vozidla s podélnými, nakloněnými kanály, ve kterých vzniká podtlak, díky němuž vzrůstá přítlak vozidla bez většího nárůstu aerodynamického odporu. [2] [8]

2.4 OBTÉKÁNÍ KOL AUTOMOBILU

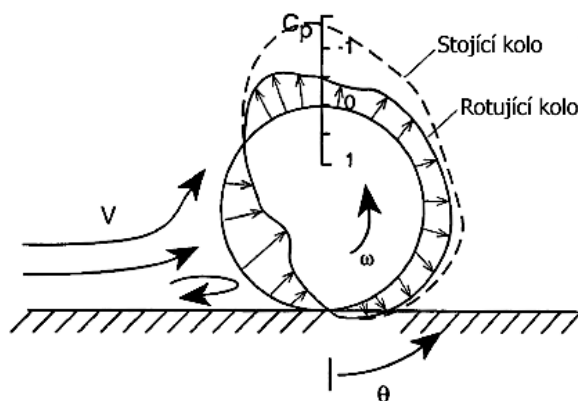
Kola automobilu jsou jedním z důležitých komponentů ovlivňujících aerodynamiku automobilu. Velmi zásadní je, zejména při určování aerodynamických vlastností ve větrných tunelech, rozdílnost obtékání stacionárních a rotujících kol. Hlavní rozdíl spočívá v dřívějším odtržení přilnutého proudění u rotujícího kola oproti stacionárnímu. [2]



Obr. 14 Odtržení přilnutého proudění rotujícího (vlevo) a stojícího kola (vpravo) [2]

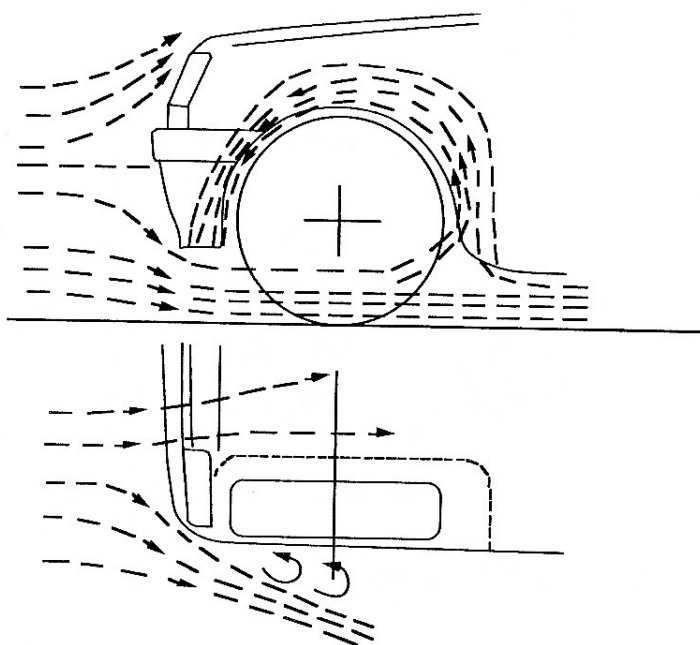


Místo, ve kterém se přilnuté proudění odtrhává, má velký vliv na rozložení tlaku na kole. Rozložení tlaku na horní straně stojícího kola způsobuje vztlak a na zadní straně zvyšuje odpor. U rotujícího kola dosahuje tlak na horní i zadní straně menších hodnot, což má za následek nižší vztlak a odpor oproti stojícímu kolu. Jev, kdy rotující válec způsobuje vztlak, se nazývá Magnusův jev. Magnusův jev nachází uplatnění například v balistice nebo v míčových hrách. [2] [4]



Obr. 15 Rozložení tlaku na povrchu rotujícího a stojícího kola [2]

Proudění okolo kol uzavřených v různých typech karoserie může být velmi složité. Pro většinu případů v karoserii uzavřených kol je typické unášení proudu vzduchu mezi podběhem a kolem. Tohoto proudění může být využito k usměrnění proudění pro chlazení nebo pro odvod proudění ze spodu vozidla za účelem zvýšení přitlaku. [2]



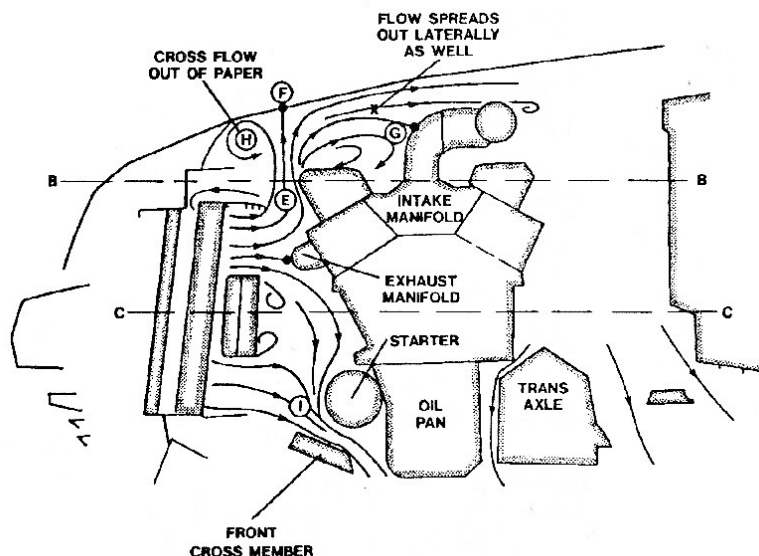
Obr. 16 Schematické znázornění proudění okolo předního kola automobilu [8]

Experimentálně bylo dokázáno, že zmenšováním dutiny okolo kola či jeho zakapotováním je možné významně snížit aerodynamický odpor způsobný kolem. [8]



2.5 PROUDĚNÍ POD KAPOTOU MOTORU, CHLADÍČÍ SYSTÉM

Chladicí systém je posledním důležitým přispěvatelem aerodynamického odporu. Proud vzduchu procházející chladičem naráží na blok motoru a převádí svůj dynamický tlak na aerodynamický odpor. Schéma proudění uvnitř typického motorového prostoru může být velmi chaotické z důvodu minimální aerodynamické optimalizace součástí v této oblasti. Vliv aerodynamického odporu motorového prostoru může být zjištěn jako rozdíl aerodynamického odporu naměřeného s otevřenými vstupy pro chladicí vzduch a aerodynamického odporu změřeného se zaslepenými otvory pro vstup chladicího vzduchu.



Obr. 17 Proudění v typickém motorovém prostoru [8]

Konstrukční uspořádání usměrňující proudění v motorovém prostoru tak, aby nedocházelo k velkým změnám v rychlosti proudění a statický tlak zůstal nízký, vede ke zmenšení aerodynamického odporu. V současnosti se snížení odporu dosahuje zejména zmenšením vstupu pro chlazení na minimum. [8]

2.6 PŘÍDAVNÉ AERODYNAMICKÉ PRVKY

Do této kategorie je možné zařadit jednoduché součásti, které změny aerodynamické vlastnosti již existujících vozidel. Použití těchto prvků je poměrně populární zejména díky jejich finanční nenáročnosti a to jak u běžných produkčních automobilů, tak u závodních vozů, kde obvykle doplňují další aerodynamické prvky. [2]

PŘEDNÍ SPOILER

Přední spoilery jsou aerodynamické povrchy prodlužující přední nárazník směrem dolů za účelem zastavení a přesměrování proudění interagující s komponenty podvozku. I přesto, že spoilery zvyšují odpor způsobený zvětšením plochy přední části vozidla, efekt snížení odporu komponentů podvozku je obvykle výraznější. Snížení tlaku pod vozidlem způsobené

spoilerem vede ke snížení vztlaku na přední i zadní nápravě. U závodních vozů mohou dlouhé přední spoilery vést až ke tvorbě přísavného efektu. [2] [8]

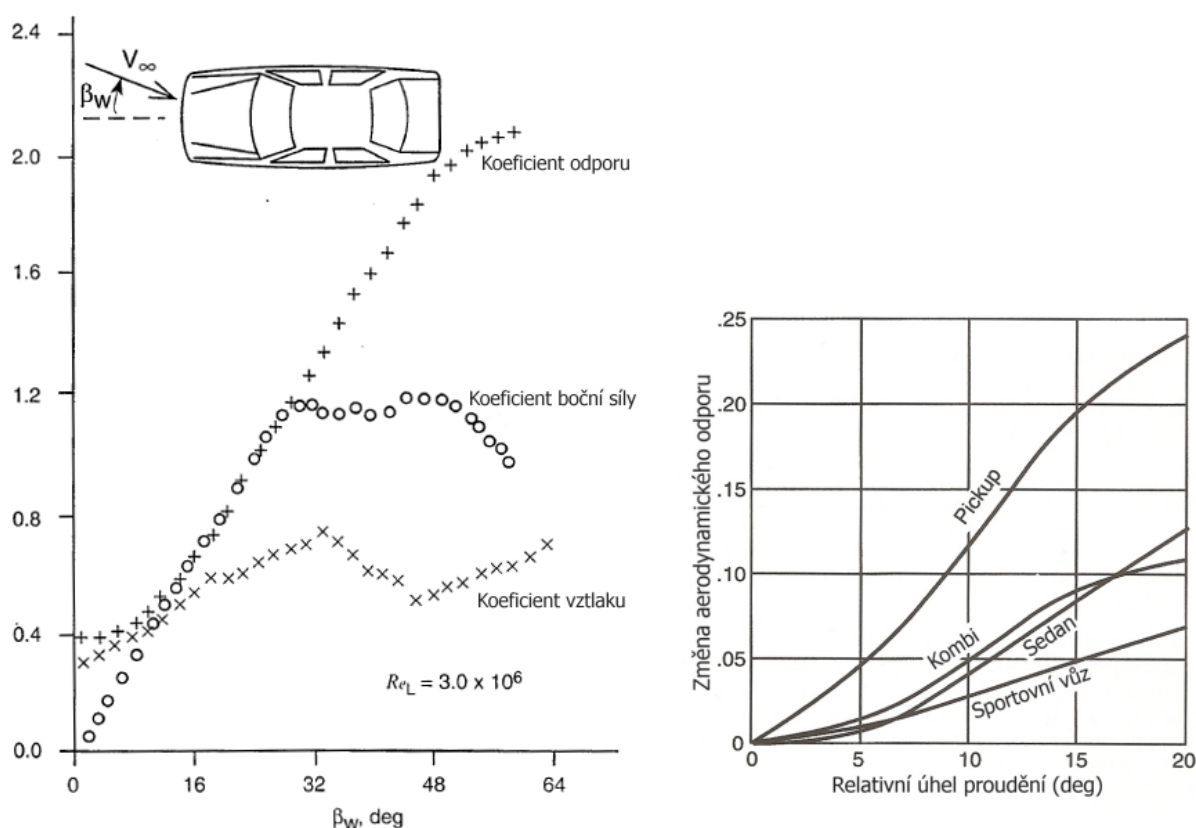
ZADNÍ SPOILER

Zadní spoiler může sloužit několika účelům. Tím, že odklání proud vzduchu směrem nahoru, zvyšuje tlak na víko zavazadlového prostoru a vytváří tím přítlak na nejvýhodnějším místě karoserie a tím snižuje vztlak na zadní nápravě. Zadní spoilery mohou též sloužit ke stabilizaci vírů v odtrženém proudění za vozidlem. Obecně však tyto spoilery také mohou přispívat jak ke zvýšení aerodynamického odporu, tak i k jeho snížení a to díky usměrnění proudění okolo zadního okna a zmenšení plochy odtrženého proudění. Správně umístěný zadní spoiler může též pozitivně ovlivnit proudění pod vozidlem. [2] [8]

2.7 DALŠÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ AERODYNAMICKÉ VLASTNOSTI VOZIDLA

Dalšími parametry působícími na aerodynamické vlastnosti vozidla jsou například úhel, pod kterým působí proudění na vozidlo, naklonění karoserie okolo příčné osy a světlá výška. [2]

SMĚR PROUDĚNÍ VŮČI VOZIDLU



Obr. 18 Závislost odporu, vztlaku a boční síly na úhlu proudění β_w pro zmenšený model automobilu s karoserií sedan a vliv úhlu proudění na koeficient odporu pro různé typy karoserie [2] [8]



Při zvětšující se odchylce proudění od podélné osy vozidla dochází ke zvyšování aerodynamického odporu, boční síly i vztlaku (u závodních automobilů generujících značný přítlak může výrazným zvětšením odchylky proudění dojít ke ztrátě přítlaku, což může vést k neovladatelnosti vozidla). Nárůst aerodynamického odporu je způsoben odtržením přilnutého proudění od boku vozidla. Velikost tohoto nárůstu závisí zejména na tvaru karoserie vozidla. [2]

NAKLONĚNÍ KAROSERIE

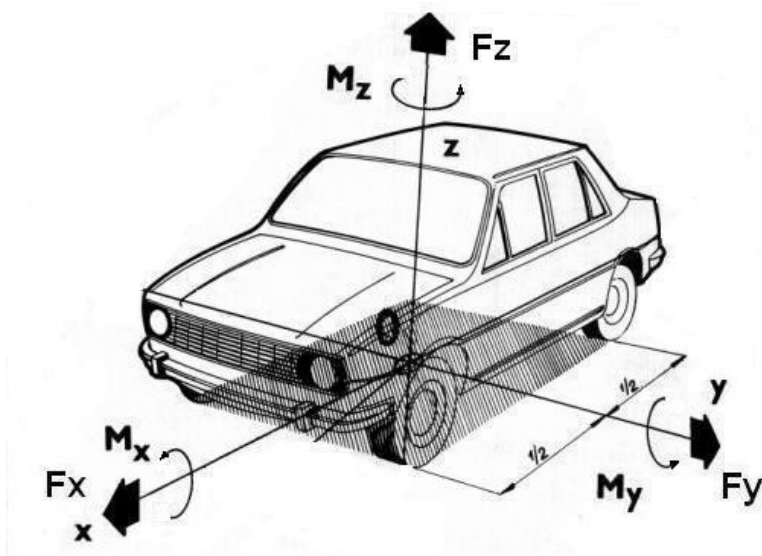
Dalším parametrem je naklonění karoserie okolo příčné osy. Většina vozidel reaguje na změnu naklonění okolo příčné osy stejně jako křídlo, to znamená, že vztlak bude narůstat s úhlem naklonění. Aerodynamický odpor obvykle nepatrně vzrůstá, pokud se úhel spodního povrchu odchýlí od nuly, a to kvůli možnosti zvětšení tloušťky mezní vrstvy. [2]

SVĚTLÁ VÝŠKA

Světlá výška je podstatná zejména pro závodní vozy, kde se snižující se světlou výškou vzrůstá přísavný efekt (dokud není dosaženo mezní výšky). Vozidla s tvarovanou spodní částí obvykle mohou mít nižší světlou výšku než vozidla s rovnou spodní částí. [2]

2.8 SOUSTAVA AERODYNAMICKÝCH SIL A MOMENTŮ

Proudící vzduch na pohybující se automobil působí časově proměnnou obecnou aerodynamickou silou. Pro posouzení vlivu této síly na zatížení vozidla je třeba ji vhodně rozložit. Nejčastěji je rozkládána do směrů souřadných os vozidla, jejichž střed neleží v těžišti vozidla, nýbrž v rovině symetrie vozu, v polovině rozvoru vozu a v rovině, na které stojí kola. Z hlediska aerodynamiky není poloha těžiště důležitá, nicméně pro použití v této práci jsou důležité aerodynamické účinky vztažené k těžišti, a proto je nutné tyto síly přepočítat. [9]



Obr. 19 Soustava aerodynamických sil a momentů [4]



Aerodynamické účinky se nejčastěji rozdělují (na základě výše popsaného souřadného systému) do tří silových a tří momentových složek. Silové složky reprezentuje aerodynamický odpor působící proti směru osy X, aerodynamický vztlak působící v ose Z a aerodynamická boční síla působící v ose Y. Momentové složky jsou klopný (okolo osy X), stáčivý (okolo osy Z) a klonivý moment (okolo osy Y). [9]

Velikost aerodynamické síly je přímo úměrná druhé mocnině rychlosti proudění, čelní ploše obtékaného tělesa a bezrozměrnému součiniteli závislému na tvaru tělesa. Jednotlivé složky aerodynamické síly a aerodynamické momenty jsou dány vztahy:

Odporová síla:

$$F_X = -\frac{1}{2} * c_X * \rho * V_\infty^2 * A \quad (6)$$

Vztlaková síla:

$$F_Z = \frac{1}{2} * c_Z * \rho * V_\infty^2 * A \quad (7)$$

Boční síla:

$$F_Y = \frac{1}{2} * c_Y * \rho * V_\infty^2 * A \quad (8)$$

Moment klopení:

$$M_X = -\frac{1}{2} * c_{MX} * \rho * V_\infty^2 * A * r \quad (9)$$

Moment stáčení:

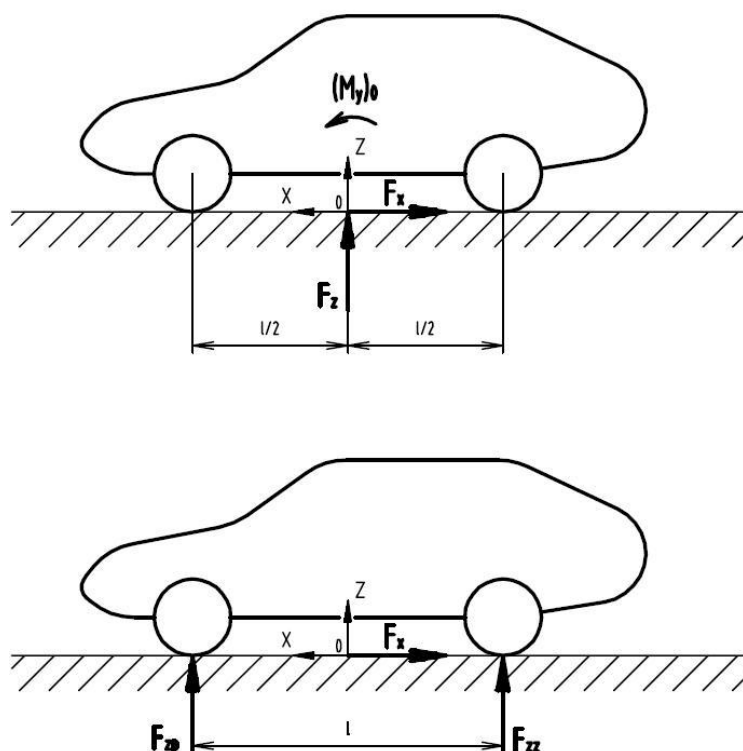
$$M_Z = \frac{1}{2} * c_{MZ} * \rho * V_\infty^2 * A * l \quad (10)$$

Moment klonění:

$$M_Y = \frac{1}{2} * c_{MY} * \rho * V_\infty^2 * A * l \quad (11)$$

kde c_X , c_Y a c_Z jsou bezrozměrné aerodynamické součinitele odporu, boční síly a vztlaku a A reprezentuje referenční plochu - pro užití v automobilizmu je obvykle uvažována největší čelní plocha vozidla. Ve vztazích pro aerodynamické momenty označují c_{MX} , c_{MY} a c_{MZ} bezrozměrné aerodynamické koeficienty momentů klopení, stáčení a klonění, l reprezentuje rozvor náprav a r reprezentuje rozchod kol. [2] [3]

Pro vyšetření pohybu vozidla v přímé jízdě uvažujeme z výše zmíněných aerodynamických účinků pouze vzdušný odpor F_X , vztlak F_Z a moment klonění M_Y , místo kterých zavedeme reakce na kolech, neboť právě kola přenáší aerodynamická zatížení na vozovku. [9]



Obr. 20 Nahrazení vztlačové síly a momentu klonění vztlačovými silami F_{zp} a F_{zz} v místě styku kol s vozovkou [4]

Klonivý moment zmenšuje vztlak na přední nápravě a zvětšuje vztlak na zadní nápravě, poté pro jednotlivé složky reakcí aerodynamického zatížení vozidla vztlakem a momentem klonění platí:

Vztlačová síla na přední nápravě:

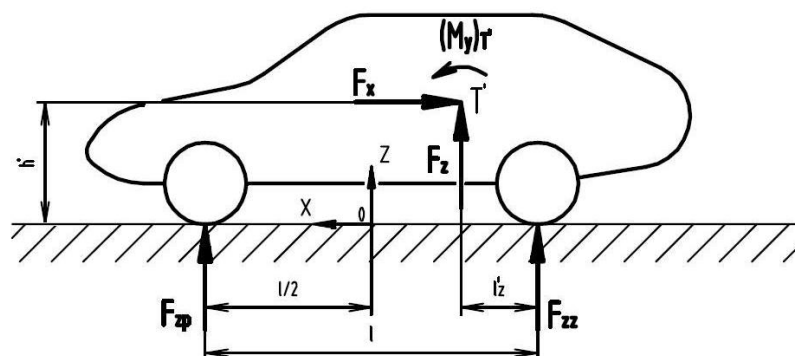
$$F_{zp} = \frac{F_z}{2} - \frac{(M_y)_0}{l} \quad (12)$$

Vztlačová síla na zadní nápravě:

$$F_{zz} = \frac{F_z}{2} + \frac{(M_y)_0}{l} \quad (13)$$

kde $(M_y)_0$ představuje moment klonění vzhledem ke středu rozvoru náprav.

Pro zjištění celkové velikosti reakcí na jednotlivé nápravy je třeba do rovnic dosadit moment klonění vzhledem k těžišti.



Obr. 21 Celkové zatížení vozidla aerodynamickými silami [4]

Moment klonění v těžišti:

$$(M_Y)_{T'} = M_Y + F_X * h - F_Z * \left(\frac{l}{2} - l'_Z \right) \quad (14)$$

Celková vztlaková síla na přední nápravě:

$$F_{ZP} = F_Z * \frac{l'_Z}{l} + F_X * \frac{h}{l} - \frac{(M_Y)_{T'}}{l} \quad (15)$$

Celková vztlaková síla na zadní nápravě:

$$F_{ZZ} = F_Z * \frac{l - l'_Z}{l} + F_X * \frac{h}{l} + \frac{(M_Y)_{T'}}{l} \quad (16)$$

kde h představuje výšku těžiště a l'_Z představuje vzdálenost těžiště od středů zadních kol.

Účinek klopného momentu a vzdušných sil v těžišti je tedy možné nahradit vztlakovými silami na nápravách. [9]

Bezrozměrné aerodynamické součinitele odporu a vztlaku c_X a c_Z jsou určovány na základě měření v aerodynamickém tunelu. Velikost těchto koeficientů závisí na čelní ploše automobilu a na tom, jak přesně je čelní plocha stanovena. Zatímco někteří výrobci produkčních automobilů velmi přesně měří čelní plochu vozidla, jiní používají méně přesné metody určování čelní plochy. Není tedy nic výjimečného najít dvě různé hodnoty aerodynamických koeficientů pro jeden vůz, přičemž rozdíly okolo pěti procent jsou poměrně běžné. Další vliv na výsledné koeficienty při měření v aerodynamickém tunelu mají například přesnost polohy modelu ve větrném tunelu a jeho velikost, či zanedbání rotujících kol. [2]



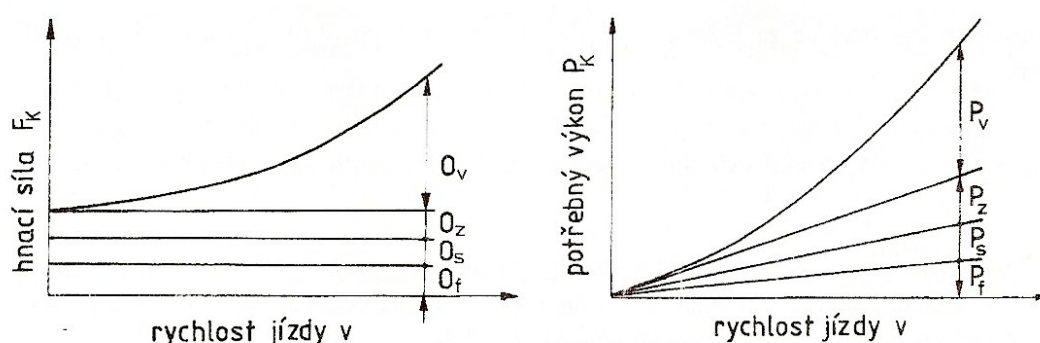
3 JÍZDNÍ ODPORY

Jízdní odpory jsou síly působící proti pohybu vozidla. Odpor valivý a odpor vzdušný (aerodynamický) působí vždy, zatímco odpor zrychlení, odpor při jízdě do svahu a odpor přivěsu působí pouze když vozidlo zrychluje či stoupá do svahu nebo táhne přívěs.

Celkový jízdní odpor je roven součtu jednotlivých odporů, je tedy dán vztahem:

$$F_K = O_f + O_V + O_S + O_Z \quad (17)$$

kde F_K představuje hnací sílu potřebnou k překonání jízdních odporů (její velikost je shodná s velikostí celkové odporové síly), O_f představuje odpor valivý, O_V odpor vzdušný, O_S odpor stoupání a O_Z odpor zrychlení. [9]



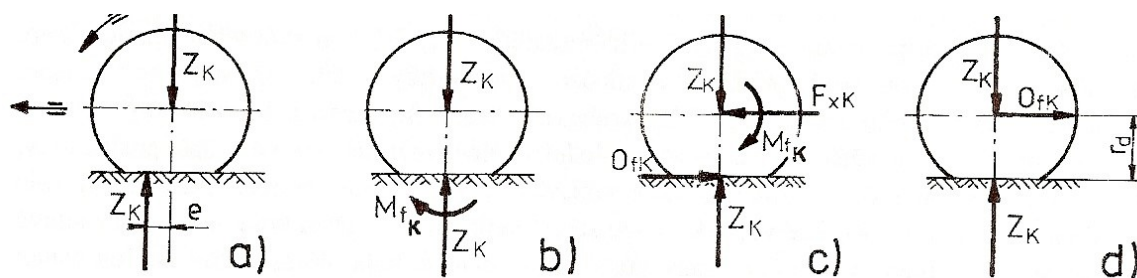
Obr. 22 Závislost velikosti hnací síly potřebné pro překonání jízdních odporů a výkonu potřebného pro překonání jízdních odporů na rychlosti jízdy [9]

3.1 VALIVÝ ODPOR

Valivý odpor je zapříčiněn deformací pneumatiky a vozovky. Styčnou plochu mezi pneumatikou a vozovkou nazýváme stopou. V přední části stopy ve směru valení dochází ke stlačování obvodu pneumatiky do roviny vozovky a v zadní části k jejímu opětovnému vyrovnání do kruhového tvaru. Vlivem ztrát v pneumatice přeměňujících se v teplo jsou síly potřebné ke stlačení pneumatiky větší než síly, kterými pneumatika působí na vozovku při návratu do kruhového tvaru. Měrné tlaky v přední části stopy jsou tedy vyšší, což způsobuje předsunutí celkové výslednice elementárních sil Z_K před svislou osu kola o vzdálenost e . Tuto výslednici je možno přesunout do svislé osy kola a zavézt moment M_{fK} , který vyvolá reakci O_{fK} směřující proti pohybu kola, kterou nazýváme valivým odporem. [9]

$$O_{fK} = Z_K * \frac{e}{r_d} = Z_K * f_K \quad (18)$$

kde f_K je součinitel valivého odporu kola a r_d je dynamický poloměr kola.



Obr. 23 Valivý odpor kola O_{JK} na volně se valícím kole [9]

Součinitel valivého odporu závisí na povrchu vozovky, na nahuštění pneumatiky (při nižším tlaku v pneumatice vzrůstá deformační práce a tím i tlumící práce, která zvyšuje valivý odpor) a na rychlosti otáčení kola. Při vyšších rychlostech velikost součinitele valivého odporu roste (v důsledku snižování měrného tlaku v zadní části stopy), při nižších rychlostech (do cca 80 km/h) je možné považovat součinitel valivého odporu za nezávislý na rychlosti. [9]

Valivý odpor vozidla O_f je dán součtem valivých odporů jednotlivých kol.

ODPORY PODOBNÉ VALIVÝM

Mezi odpory podobné valivým je možné zařadit odpor, který vzniká vlivem sbíhavosti předních kol (je velmi malý, tudíž v praktických výpočtech nebývá uvažován). Další přídavný odpor vzniká při jízdě přes nerovnosti, kdy v pneumatice vznikají přídavné deformace. Podobná situace je u tlumičů, kde se mechanická energie přeměňuje v teplo a pohonná jednotka vozidla musí tyto ztráty překonávat. Dalším jízdním odporem je odpor vznikající při zatáčení vozidla, kdy se kola odvalují se směrými úchyly. Vliv směrové úchyly na součinitel valivého odporu je velmi progresivní. [9]

3.2 ODPOR VZDUŠNÝ (AERODYNAMICKÝ)

Vzdušný odpor je odpor vznikající obtékáním vzduchu kolem jedoucího vozidla, odpory vznikající průchodem chladičím a větracím systémem vozu, či odpory vzniklé vířením a třením vzduchu u otáčejících se kol. [9]

Vzdušný odpor je reprezentován aerodynamickou odporovou silou F_X , která je zmíněna výše v této práci.

$$O_V = F_X = -\frac{1}{2} * c_X * \rho * V_\infty^2 * A \quad (19)$$

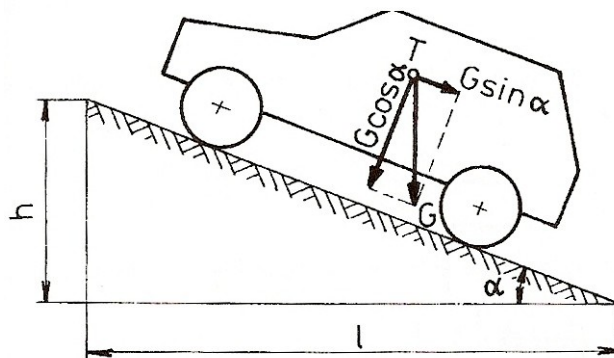
3.3 ODPOR STOUPÁNÍ

Odpor stoupání je definován jako složka tíhy vozidla rovnoběžná s povrchem vozovky, platí tedy:



$$O_s = \pm G * \sin \alpha \quad (20)$$

kde O_s představuje odpor stoupání, G celkovou tíhu vozidla a α úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou vozovky neboli úhel stoupání. Znaménko plus v rovnici platí pro případ jízdy do svahu, znaménko mínus pro případ jízdy ze svahu, kdy sinová složka tíhy vozidla není odporem, ale vozidlo pohání.



Obr. 24 Určení odporu stoupání [9]

Odpor stoupání působí v těžišti vozidla. Při praktických výpočtech se obvykle místo úhlu stoupání udává sklon svahu definovaný jako s :

$$s = \frac{h}{l} = \tan \alpha \quad (21)$$

Pro malé úhly stoupání je $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ a tudíž:

$$O_s = \pm G * s \quad (22)$$

Tento vztah je možné použít do hodnoty $\alpha = 17^\circ$, nebo $s = 0,3$, kdy rozdíl mezi $\sin \alpha$ a $\tan \alpha$ je asi 5%. Maximální stoupání většiny silnic a dálnic je menší než 17° . [9]

3.4 ODPOR ZRYCHLENÍ

Při zrychlování působí na vozidlo proti směru jeho zrychlení setrvačná síla, nazývaná odporem zrychlení, která je dána vztahem:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \quad (23)$$

kde O_{zp} reprezentuje odpor zrychlení posuvných částí a O_{zr} odpor zrychlení rotačních částí, které jsou definovány vztahy:

$$O_{zp} = m * \ddot{x} \quad (24)$$

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_d} \quad (25)$$



kde m představuje hmotnost posuvných částí a M_r setrvačný moment rotujících částí vozidla, který je dán vztahem:

$$M_r = M_{rm} + M_{rp} + M_{rk} \quad (26)$$

kde M_{rm} je moment na hnacích kolech vozidla potřebný ke zrychlení rotujících částí motoru, M_{rp} je moment nutný pro zrychlení rotujících částí převodovky a M_{rk} je moment potřebný pro zrychlení vozidlových kol. Tyto momenty jsou vyjádřeny vztahy:

$$M_{rm} = J_m * \ddot{\varphi}_m * i_c * \eta \quad (27)$$

$$M_{rp} = J_p * \ddot{\varphi}_p * i_r * \eta \quad (28)$$

$$M_{rk} = \sum_i J_{k_i} * \ddot{\varphi}_{k_i} \quad (29)$$

kde J_m , J_p a J_k jsou hmotnostní momenty setrvačnosti rotujících částí motoru, rotujících částí převodovky a kol, $\ddot{\varphi}_m$, $\ddot{\varphi}_p$ a $\ddot{\varphi}_k$ jsou úhlová zrychlení rotujících částí motoru, rotujících částí převodovky a kol, i_c je celkový převod mezi motorem a hnacími koly a i_r je převod rozvodovky a η je mechanická účinnost. [9]

Výsledný odpor zrychlení posuvných a rotačních částí v konečném tvaru je tedy:

$$O_z = \left[1 + \frac{(J_m * i_c^2 + J_p * i_r^2) * \eta + \sum J_{k_i}}{m * r_d^2} \right] * m * \ddot{x} = \vartheta * m * \ddot{x} \quad (30)$$

kde ϑ je součinitel vlivu rotačních částí reprezentující výraz v hranaté závorce. [9]

3.5 ODPOR PŘÍVĚSU

Odpor přívěsu je síla působící v ose spojovacího mechanismu zahrnující odpor valivý, odpor stoupání i odpor zrychlení přívěsu, které je třeba určit zvlášť pro přívěs, na rozdíl od odporu vzdušného (aerodynamického), který je třeba určit pro celou jízdní soupravu. Určení odporu přívěsu je velmi podstatné, neboť významně zvyšuje potřebnou hnací sílu tažného vozidla. [9]



4 MOŽNOSTI ZJIŠŤOVÁNÍ AERODYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ VOZIDEL

Určit aerodynamické vlastnosti vozidel je možné pomocí jízdních testů vozidla (například dojezdová zkouška či zkouška za konstantní rychlosti), případně měřením v aerodynamickém tunelu, nebo výpočetně za použití specializovaných softwarů (například Fluent, CFX, CFXDesign) a výpočetní techniky. Data získaná jednotlivými způsoby by měla zahrnovat alespoň část z těchto informací:

- Aerodynamické součinitele odporu a vztlaku (rozložení vztlaku mezi přední a zadní nápravu) apod.
- Rozložení tlaků na karoserii - tato data mohou poskytnout vodičovi jak zlepšit tvarování vozidla.
- Vizualizaci proudnic okolo karoserie pro určení místa odtržení proudění. [2]

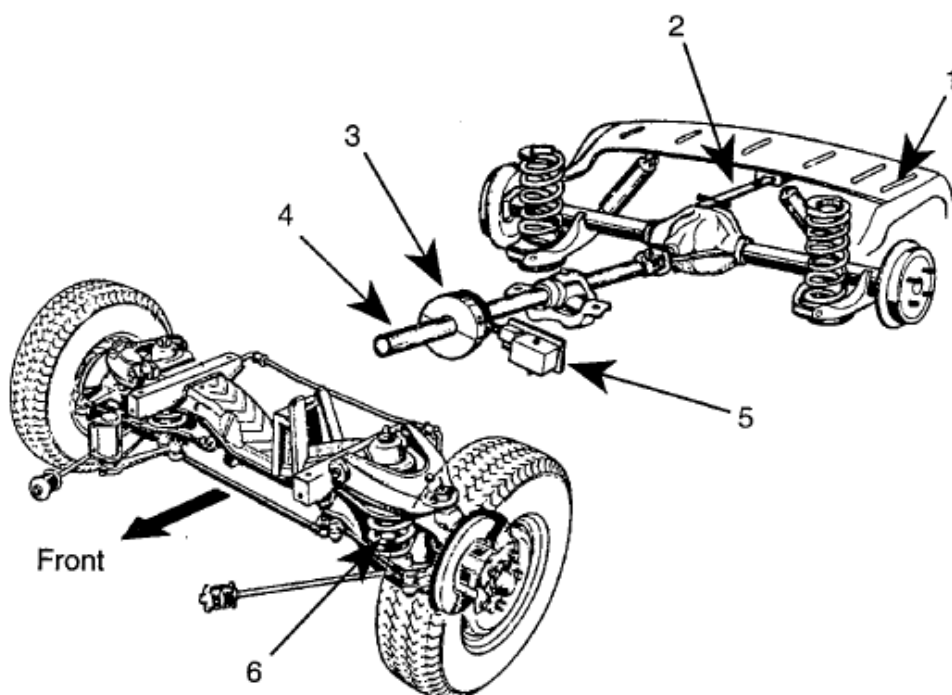
4.1 JÍZDNÍ TESTY VOZIDEL

Na první pohled se může zdát, že jízdní testy jsou nejjednodušším způsobem jak získat požadované údaje, nicméně pokud požadujeme dostatečně přesné vyhodnocení aerodynamického odporu, vztlaku, případně rozložení vztlaků mezi přední a zadní nápravu, narazíme na velké množství problémů - jako vibrace zavěšení kola, různé povětrnostní vlivy, či naklonění testovací dráhy. Nevýhodou je též nemožnost testovat vozidla, která jsou ve fázi vývoje, kdy ještě neexistuje vozidlo, které by bylo možno otestovat. I poté jsou však jízdní testy vozidel nevýhodné z důvodu velké časové náročnosti a obtížné opakovatelnosti, pokud na vozidle provádíme během testů různé aerodynamické změny. Největší výhodou jízdních testů při využití u závodních vozidel je možnost testovat konkrétní vůz na konkrétní trati a vyhodnocovat změny na základě měření maximální rychlosti vozidla, nebo jeho rychlost v konkrétní zatáčce. [2]

4.1.1 MĚŘENÍ VZTLAKU

Klasické měření vztlaku je založeno na měření velikosti stlačení tlumičů či pružin, nebo velikosti změny zatížení nápravy v důsledku aerodynamických sil. Ze změny délky pružiny či tlumiče každého kola lze určit působící vztlakovou sílu. Výhodou je, že jsou získány výsledky pro každé kolo zvlášť, nevýhodou (zejména pro závodní vozidla formulového typu) je, že vztlak působící na jednotlivá kola (nikoli na karoserii) není měřen, což ale například při provádění porovnávacích testů pro různé nastavení vozidla nevádí. [2]

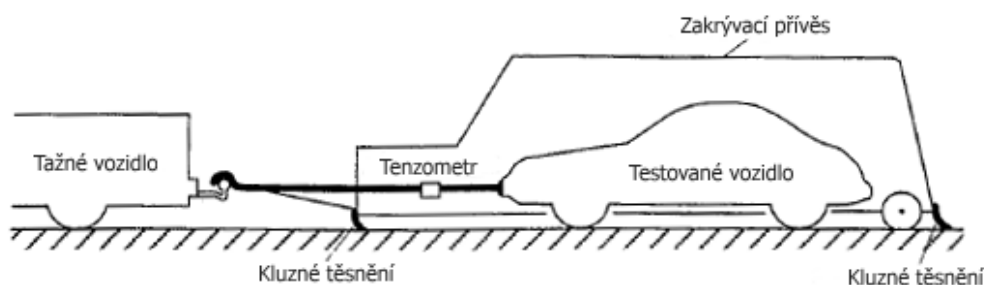
Aerodynamické zatížení na zavěšení může být měřeno pomocí tenzometrů namontovaných na pružinách či pomocí optických snímačů jízdní výšky. Měření pomocí tenzometrů může být užito i u vozidel s aktivním odpružením, které udržuje konstantní světlou výšku. Pro výpočet aerodynamických součinitelů je třeba simultánně měřit rychlost vozidla, což je obvykle prováděno pomocí Pitotovy trubice, kterou je třeba umístit na vozidlo do dostatečné výšky a dostatečně dopředu, aby měření nebylo ovlivněno změnami v proudění okolo vozidla. Je třeba též měřit směr větru a teplotu vzduchu. [2]



Obr. 25 Systém pro měření aerodynamického odporu a vzlaku: 1 - karoserie vozidla, 2 - listová pružina pro měření vzlaku na zadní nápravě, 3 - anténa pro vysílání velikosti točivého momentu, 4 - snímač točivého momentu, 5 - přijímač a vyhodnocovač točivého momentu, 6 - tenzometry pro měření vzlaku na přední nápravě [2]

4.1.2 MĚŘENÍ AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Určování aerodynamického odporu pomocí dojezdových zkoušek je komplikováno tím, že v celkovém odporu působícím na vozidlo jsou zahrnuty kromě odporu aerodynamického i odpor valivý a odpor pohonného ústrojí. Kombinovaný odpor zahrnující odpor valení a odpor pohonného ústrojí vozidla je možné určit experimentálně, a to metodou, kdy je vozidlo taženo uvnitř boxu, který jej odděluje od okolního prostředí a uvnitř kterého je měřena tažná síla neobsahující složku aerodynamického odporu. Se znalostí kombinovaného odporu lze aerodynamický odpor určit zjištěním celkového odporu působícího na vozidlo a odečtením odporu kombinovaného. [2]



Obr. 26 Měření kombinovaného odporu zahrnujícího valivý odpor a odpor pohonného ústrojí vozidla [2]



V některých případech je hnací síla zjišťována měřením točivého momentu na hnacím hřídeli speciálními tenzometry, jejichž signál je zkalibrován pro měření celkové hnací síly, ze které odečtením síly valivého odporu získáme požadovanou aerodynamickou odporovou sílu. [2]

Mnohem jednodušší je, je-li vozidlo taženo a je snímána tažná síla. Toto uspořádání má však velkou nevýhodu v rozrušení proudění tažným vozidlem, kterou neodstraní ani použití velmi dlouhého tažného lana. [2]

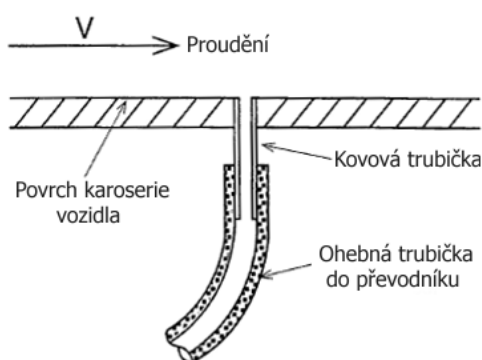
Měření maximální rychlosti, často používané při testování závodních vozů, může poskytnout velmi dobré porovnávací informace o aerodynamickém odporu za předpokladu, že rychlost větru působící boční síly je ve srovnání s rychlostí vozidla zanedbatelná. [2]

Dojezdové zkoušky byly úspěšně používány v minulosti. Při dojezdové zkoušce je testované vozidlo rozjeto na určitou počáteční rychlost a poté se pohybuje pouze vlivem setrvačnosti a je zpomalováno až do zastavení vlivem jízdních odporů. Aerodynamický součinitel odporu může být určen jak z průběhu zpomalení vozidla, tak z dráhy, kterou vozidlo urazí do zastavení. Tato zkouška vyžaduje též znalost dalších jízdních odporů, které působí na vozidlo v průběhu zpomalování a je citlivější na povětrnostní podmínky než například zkouška za konstantní rychlosti, proto pro dosažení dobré přesnosti výsledků je nutné velký počet opakování. [2]

4.1.3 MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ TLAKŮ NA KAROSERII

Měření rozložení tlaků na povrchu obtékaného tělesa při jízdních testech či v aerodynamickém tunelu je v podstatě stejné.

Rozložení tlaků může být měřeno pomocí malých otvorů vyvrtaných v povrchu tělesa a připojených na převodník (otvor by měl být veden kolmo na okolní povrch). Tato metoda měří pouze lokální statický tlak, avšak pro určení celkového tlaku je třeba znalost dynamického tlaku, který může být měřen Pitotovou trubicí. Ke zjištění rozložení tlaků na karoserii je potřeba velké množství malých otvorů vyvrtaných v povrchu a připojených k centrální měřicí jednotce (převodníku). [2]



Obr. 27 Schéma provedení otvorů na karoserii pro měření statického tlaku [2]

Měření rozložení tlaků na karoserii může být při měření pomocí jízdních zkoušek méně přesné než při měření v aerodynamickém tunelu z důvodu možnosti zanesení otvorů prachem nebo drobným hmyzem. [2]



4.1.4 ZVIDITELNĚNÍ PROUDNIC

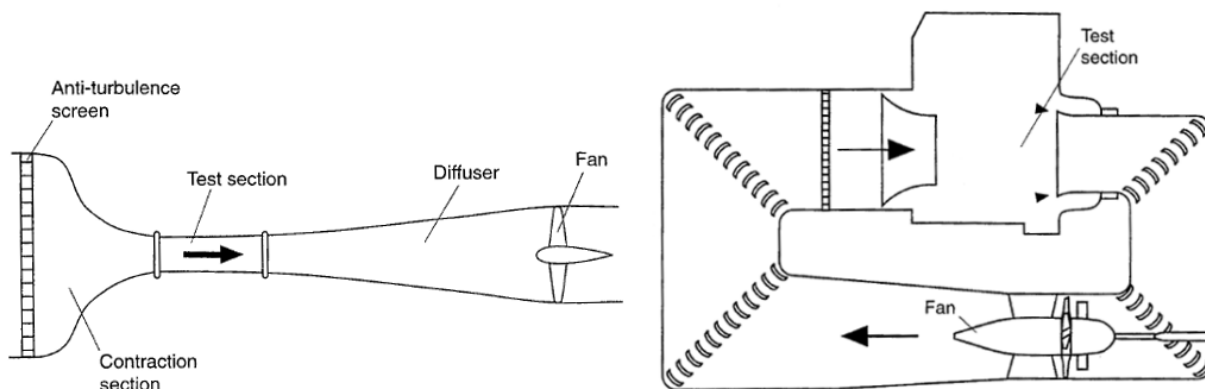
Ve většině případů používané metody pro vizualizaci proudění jsou velmi podobné jak pro použití při jízdách testech, tak při měření v aerodynamickém tunelu. Metody zviditelnění proudnic je možné rozdělit na metody na povrchu vozidla a mimo povrch vozidla. Do první skupiny je možné zařadit užití krátkých vláken přilepených za jeden konec ke karoserii, které se velmi lehce ohnou do směru proudění. Při přilnutém proudění vlákna stabilně drží směr proudění, zatímco v případě odtrženého proudění se třepetají a často nemíří směrem, ve kterém očekáváme proudění. Stejně informace je možné získat pozorováním stop viskózní tekutiny (obvykle olej s barvicí přísadou), která je rozmazávána prouděním v blízkosti povrchu. Druhým typem zviditelňování proudění jsou metody mimo povrch vozidla, obvykle prováděné pomocí stopy kouře v proudění. Stopy kouře jsou ve větrném tunelu vytvářeny pomocí soustavy trubíc před vozidlem, ze kterých je vypouštěn kouř, zatímco při jízdách testech musí být zařízení generující kouř umístěno na testovaném vozidle. [2]

4.2 MĚŘENÍ V AERODYNAMICKÉM TUNELU

Aerodynamické tunely mají oproti jízdám testům výhodu v regulovatelných vlastnostech prostředí proudícím okolo automobilu, nicméně testování vozidel v jejich reálné velikosti je velmi nákladné a výsledky testování zmenšených modelů vozidel nemusí plně korespondovat s výsledky reálných vozidel. Další problémy přináší stěny a nepohyblivá podlaha tunelu. Tyto problémy mohou vyústit ve výsledky neodpovídající podmínkám ve volném prostředí. [2]

4.2.1 TYPY VĚTRNÝCH TUNELŮ

Větrné tunely s otevřeným okruhem jsou obvykle menší tunely používané pro zjišťování aerodynamických charakteristik zmenšených modelů vozů, jejich výhodou jsou menší pořizovací náklady či možnost vypouštět do tunelu kouř nebo spaliny aniž by se vracely, nevýhodami jsou pak náchylnost na okolní povětrnostní podmínky či hluk šířící se od tunelu do okolí a oproti srovnatelnému uzavřenému tunelu větší energetická náročnost.



Obr. 28 Schéma aerodynamického tunelu s otevřeným okruhem a uzavřeným testovacím úsekem (vlevo) a tunelu s uzavřeným okruhem a otevřeným testovacím úsekem (vpravo) [2]

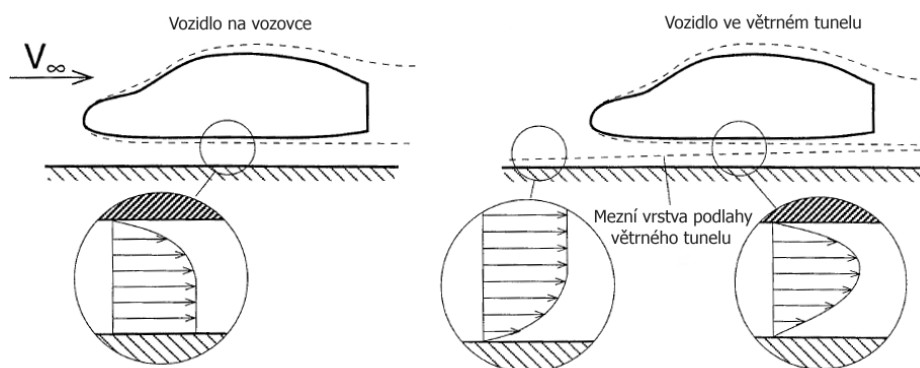
Větrné tunely s uzavřeným okruhem jsou obvykle větších rozměrů a jsou koncipovány pro měření na reálných vozech, nebo na modelech o skutečné velikosti, mezi jejich výhody patří nižší energetická náročnost a netečnost vůči okolním povětrnostním podmínkám, nevýhodami pak jsou vyšší cena, či možnost akumulace kouře nebo spalin a při déle trvajících testech i zvyšování teploty proudícího vzduchu - proto bývají tyto tunely vybaveny výměníky tepla a ventilátory přivádějícími čerstvý vzduch do tunelu. Tunely lze též dělit podle tvaru testovacího úseku na tunely s uzavřeným testovacím úsekem a s otevřeným testovacím úsekem. [2]

4.2.2 VELIKOST MODELU, VELIKOST TESTOVACÍHO ÚSEKU TUNELU

Je-li objekt obtékán prouděním ve volném prostoru, obtékání objektu způsobí pouze lokální rozrušení proudu a proudnice v dostatečné vzdálenosti od objektu nebudou ovlivněny a zůstanou tedy rovnoběžné se směrem proudění. Pokud je ovšem objekt umístěn mezi dvě zdi, dochází k deformaci proudění, a pokud jsou tyto zdi dostatečně blízko obtékanému objektu, v mezeře mezi obtékaným objektem a zdmi dojde ke zvýšení rychlosti proudění, což ovlivní velikosti odporové a vztahové síly. Proto je třeba co největší testovací úsek větrného tunelu. Ovšem cena tunelu, náklady na jeho obsluhu a výkon s velikostí tunelu výrazně narůstají, proto by bylo vhodné, aby do tunelu byly umístěny co možná nejmenší modely. Nicméně vývojáři automobilů preferují modely větší nebo o skutečné velikosti, protože na nich mohou být propracovanější detaily. Pokud je například testováno kompletní vozidlo, potom obsahuje detaily (například chladiče), které nemohou být přesně reprodukovány v menším měřítku. Téměř vždy tedy dochází ke kompromisům mezi požadavky na velikost modelu a mírou ovlivnění výsledků měření efektem blízkých zdí, proto se výsledky měření ve větrných tunelech matematicky korigují. [2]

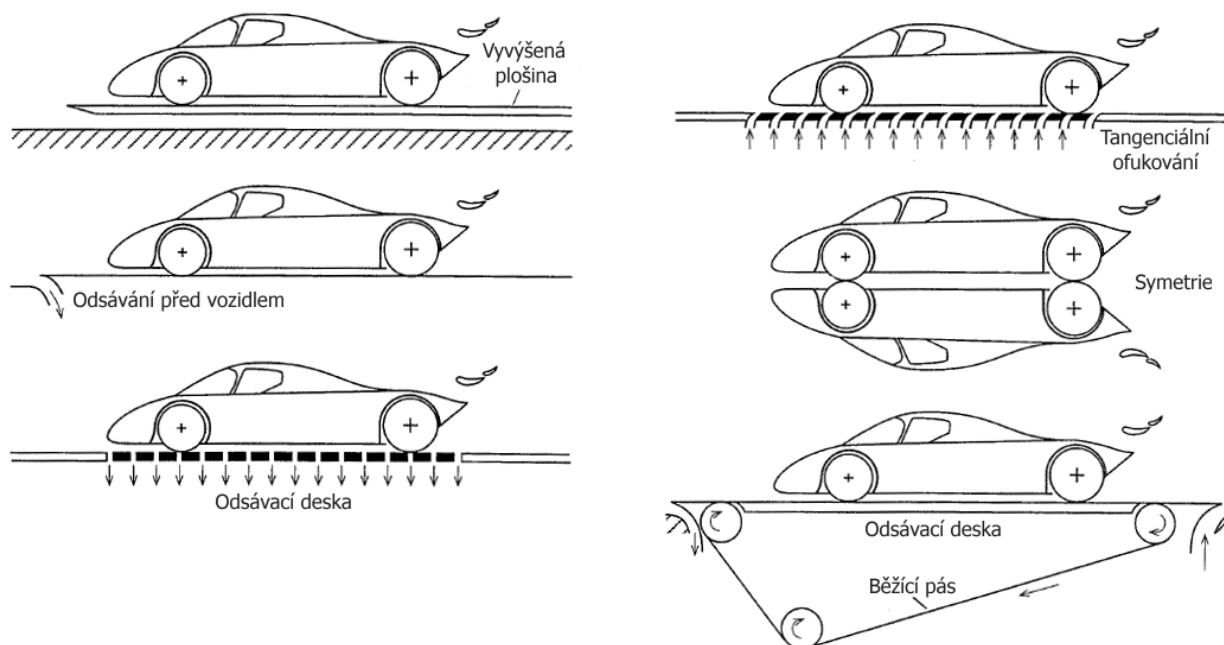
4.2.3 SIMULACE POHYBU VOZOVKY

Při pohybu vozidla po vozovce je relativní rychlost proudění vůči vozovce nulová (předpokládáno bezvětrí), zatímco v aerodynamickém tunelu s nepohyblivou podlahou je relativní rychlost mezi podlahou a prouděním značná, což vede k jinému chování mezní vrstvy mezi spodkem vozidla a vozovkou než mezi spodkem vozidla a podlahou tunelu. Vzhledem k tloušťce mezní vrstvy podlahy tunelu (obvykle okolo 0,1 metru) dochází u většiny neterénních vozidel k ovlivnění proudění pod vozidlem. [2]



Obr. 29 Tvary mezní vrstvy pod vozidlem na vozovce a ve větrném tunelu [2]

Řešení problému mezní vrstvy podlahy tunelu je několik. Například umístění vozidla nad mezní vrstvu podlahy, které se však spíše nepoužívá, neboť vede k poměrně velkému zkreslení aerodynamických účinků na vozidlo. Další možností je umístění vozidla na vyvýšenou plošinu - pod vozidlem je mezní vrstva plošiny, na které vozidlo stojí, a ta je mnohem menší než mezní vrstva podlahy tunelu. Další možností je použití odsávání mezní vrstvy před vozidlem, takže nová mezní vrstva pod vozidlem je značně tenčí (pro zachování dobré přesnosti by tloušťka mezní vrstvy neměla přesáhnout 10% světlé výšky vozidla). Další možností je umístění štěrbin pro odsávání pod vozidlo. Konstrukce a odladění takové odsávací desky je však značně náročné a drahé. Další metodou je tangenciální ofukování mezní vrstvy, které je sice efektivní, nicméně drahé. Další metoda je založena na principu symetrie, základní myšlenkou tedy je, že osa symetrie oddělující dva identické modely je také proudnice, což by mělo zajistit získání simulace vozovky. Posledním způsobem je metoda běžícího pásu, která je poměrně populární, avšak není bez problémů - model musí být držen na místě pomocí ramena, které ovlivňuje okolní proudění, dále je to omezená rychlost běžícího pásu, či jeho nasávání u vozidel s přísavným efektem (možnost řešení pomocí přídatného odsávání pod běžícím pásem), či nemožnost měření zatížení pod koly. [2]



Obr. 30 Možnosti simulace pohybující se podlahy v aerodynamických tunelech [2]

4.2.4 METODY UMÍSTĚNÍ MODELU V AERODYNAMICKÉM TUNELU

Nejjednodušší metodou testování skutečného vozu je jeho umístění na podlahu tunelu. Nejčastěji jsou kola vozidla umístěna na malé panely oddělené od zbytku podlahy tunelu a připojené na šestikomponentní váhy, které někdy mohou být umístěny přímo v modelu. Šestikomponentní váhy dokážou měřit všechna působící zatížení - tedy tři silové a tři momentové složky. Tyto váhy jsou složeny ze čtyř malých kruhových panelů, které jsou připevněny na horní konce čtyř podpěr, jež jsou přímo připojeny k zařízení měřícímu zatížení, někdy nazývanému jednoduše váhy. [2]



Pokud je požadováno, aby se kola vozidla otáčela, potom je možné využít motorů napojených na otáčející se válce, na kterých jsou umístěna kola testovaného vozidla, umístěných přímo ve váhách. V tomto případě musí být model fixován k tunelu, aby nedošlo ke sjetí vozidla či modelu z válců. [2]

Pokud je pro simulaci vozovky použit běžící pás, pak je model či vozidlo připevněno k tunelu pomocí vzpěry umístěné buď na zadní část vozidla nebo na střechu. Z aerodynamického hlediska je podpěra na zadní části vozidla výhodnější než podpěra na střeše, neboť méně narušuje proudění okolo vozidla. Síly a momenty jsou v tomto případě měřeny pomocí šestikomponentních vah umístěných mezi model a podpěru. [2]

4.3 VÝPOČTOVÉ AERODYNAMICKÉ MODELOVÁNÍ

Aerodynamické simulace se jeví jako ideální způsob jak zjišťovat aerodynamické vlastnosti vozidel, neboť není potřeba reálného vozidla či jeho fyzického modelu. V současnosti je CFD (computational fluid dynamics) modelování velmi rozšířeno díky dobré kompatibilitě se současnou výpočetní technikou a schopností dosáhnout relevantních výsledků.



5 JÍZDNÍ TESTY

V této práci jsou zpracována data naměřená v listopadu 2011 ve spolupráci s týmem pana Tomáše Chabry, Chabr Motorsport, který pro měření poskytl formuli Van Diemen RF-02 závodní kategorie E2 - 1400. [10]



Obr. 31 Formule Van Diemen RF-02 [10]

5.1 PROVEDENÉ ZKOUŠKY

Zpracovávaná data pochází z dojezdových zkoušek a zkoušek za konstantní rychlosti.

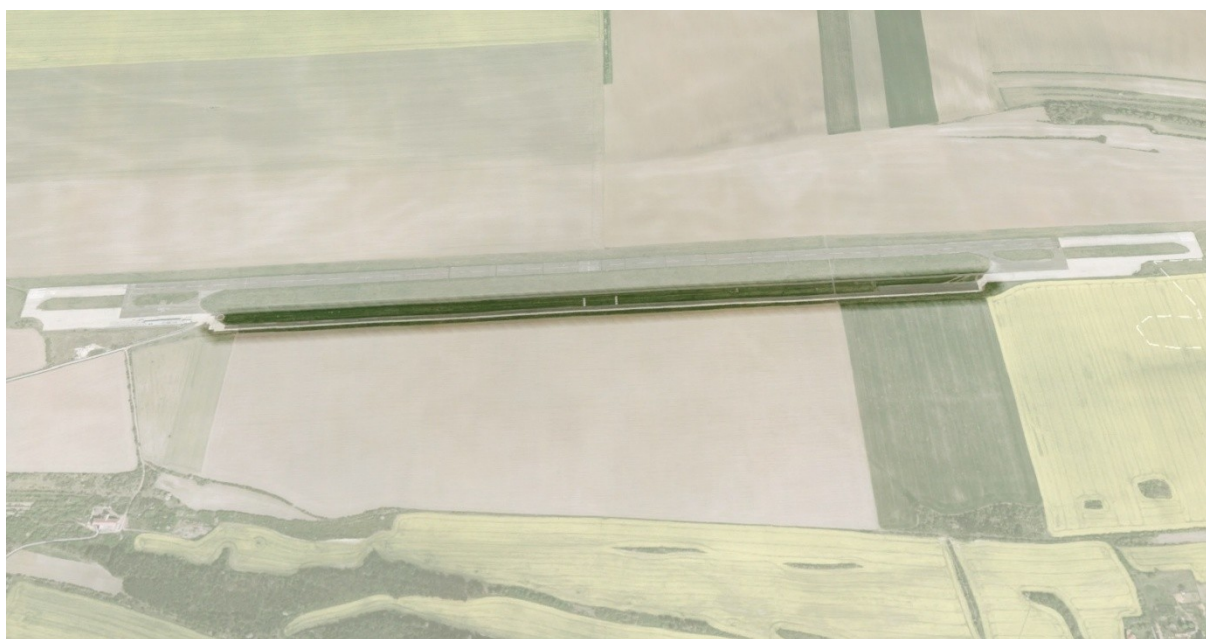
Průběh dojezdové zkoušky je dán normou ČSN 30 0554 - Silniční motorová vozidla. Dojezdová zkouška silničních motorových vozidel. Tato norma slouží k určování závislosti jízdního odporu vozidla na rychlosti jízdy pro osobní automobily, nákladní automobily, autobusy a vozidla s návěsem i přívěsem.

Při dojezdové zkoušce dle této normy se vozidlo pohybuje po dosažení určité rychlosti pouze svojí setrvačností, a zpomalují jej pouze jízdní odpory. Zkušební dráha musí mít dostatečnou délku pro rozjezd na potřebnou rychlost a bezpečné zastavení vozidla po provedení zkoušky. Úsek na kterém probíhá samotné měření musí být minimálně 1000 metrů dlouhý, musí mít kvalitní pevný povrch, maximálně jednaprocentní podélný sklon a maximálně jeden a půl procentní příčný sklon. Zkoušené vozidlo musí odpovídat technickým podkladům, pneumatiky musí mít minimálně dvoutřetinovou výšku dezénu, musí být plně zatížené a zahřáté na provozní teplotu nepřetržitou jízdou o délce trvání alespoň jedné hodiny. Zkušební rychlost nutná k provedení zkoušky je rovna devadesáti procentům maximální rychlosti vozidla, nejvýše však 150 km/h. Teplota vzduchu se během zkoušky musí pohybovat v rozmezí 5 - 25°C, vítr musí dosahovat rychlosti nejvýše 1,5 m/s a tlak vzduchu se musí pohybovat v rozmezí 97,33 - 101,25 kPa.



Zkouška za konstantní rychlosti (straight-line test) byla prováděna za účelem zjištění zatížení na jednotlivých nápravách. Zkouška probíhá tak, že vozidlo je rozjeto v přímém směru na určitou rychlost, a setrvá na této rychlosti po stanovenou dobu. Při této zkoušce je důležité, aby řidič vozidla byl schopen opakovaně dosáhnout požadované rychlosti na přibližně stejném úseku trati a udržet konstantní rychlost a směr po dobu zkoušky. [10]

Zkoušky byly prováděny na 1,5 km dlouhé obslužné cestě na letišti v Panenském Týnci, která sice nesplňuje požadavky na zkušební dráhu dle normy ČSN 30 0554, a není tedy zcela ideální pro tato měření, nicméně v době, kdy probíhalo měření, nebyla vhodnější testovací dráha k dispozici. [10]



Obr. 32 Letiště Panenský Týnec s vyznačenou obslužnou cestou, na které probíhalo měření [11]

5.1.1 ZKUŠEBNÍ VOZIDLO

Zkušebním vozidlem byla formule Van Diemen RF-02 týmu Chabr Motorsport. Vozidlo je postaveno na trubkovém rámu, je osazeno čtyřválcovým, šestnáctiventilovým motorem Kawasaki o výkonu 147 kW při 9000 ot/min a maximálním točivým momentem 155 Nm při 9000 ot/min. Vozidlo má rozvor náprav 2,44 metru a je na něm možné měnit sklon předního spoileru, sklon zadního spoileru, výšku přední i zadní nápravy a tuhost tlumičů. Statické zatížení vozidla s řidičem vztažené na jedno kolo bylo 121,25 kg na přední nápravě a 149 kg na zadní nápravě, celková hmotnost vozidla tedy činila 540,5 kg. [10]

Vozidlo bylo osazeno Hallovým snímačem otáček kol s hustotou záznamu 50 Hz. Na všech tlumičích byly nainstalovány potenciometry k určení výchylek jednotlivých kol zaznamenávající data s frekvencí 100 Hz. Ve vozidle byl nainstalováno GPS zařízení snímající polohu vozidla, rychlost a zrychlení ve třech osách. Všechna naměřená data byla ukládána pomocí záznamového zařízení AIM EVO 4. [10]



5.1.2 METODIKA MĚŘENÍ

Na počátku byly na zkušební dráze rozmístěny kužely označující začátek a konec měřeného úseku. Stejným způsobem byly rozmístěny časové závory (beacon's) sloužící ke spuštění a ukončení záznamu dat. Aby bylo docíleno jisté eliminace nedokonalostí dráhy (zejména časté změny sklonu), byly všechny jízdy prováděny v obou směrech. [10]

Dojezdové zkoušky byly pro získání většího množství dat prováděny dvakrát (celkově tedy čtyři jízdy - dvakrát pro každý směr), kromě jednoho nastavení vozu, u kterého byla dojezdová zkouška provedena čtyřikrát a dvou nastavení vozu, pro které byla dojezdová zkouška provedena pouze jednou. Dojezdové zkoušky byly navrženy tak, že rychlost, ze které mělo vozidlo začít zpomalovat, měla být maximální rychlost, jaké je vozidlo s daným nastavením schopno dosáhnout. Kvůli nerovnostem na trati a riziku poškození vozu byla počáteční rychlost snížena na 200 km/h. Byla též určena minimální rychlost pro kterou mají měření smysl, a to 80 km/h, což je přibližně minimální rychlost, kterou se vozidlo běžně pohybuje po závodních okruzích. [10]

Zkouška za konstantní rychlosti byla prováděna při rychlostech přibližně 200 km/h, 160 km/h a 110 km/h. Pro prvních pět nastavení byly zkoušky za konstantní rychlosti pro rychlosti 160 km/h a 110 km/h prováděny na celém měřeném úseku trati (pro jednu jízdu - jedna zkouška za konstantní rychlosti), pro další nastavení byly, patrně z důvodu urychlení průběhu zkoušek, v jedné jízdě provedeny zkoušky při obou rychlostech, díky čemuž je pro tyto nastavení a rychlosti k dispozici zhruba poloviční objem naměřených dat, pouze zhruba z poloviny měřeného úseku trati. Tento fakt, že některé dojezdové zkoušky jsou měřeny na celém úseku trati, a jiné pouze na polovině úseku trati, tedy při různých podmínkách může mít za následek zhoršení validity výsledků.

Zkušební vozidlo bylo na počátku testování zahřáté na provozní teplotu, tlak v pneumatikách dosahoval předepsaných hodnot a byly doplněny pohonné hmoty. Van Diemen RF-02 je jednomístné závodní vozidlo, tudíž v průběhu zkoušek k plnému obsazení vozidla stačila osoba řidiče. Před každou jízdou byla za pomoci meteostanice Brondi CK-20 změřena teplota, tlak a vlhkost vzduchu. Rychlost větru byla měřena ručním anemometrem, pomocí směrové růžice byl měřen směr větru. Bezkontaktním pyrometrem byla měřena teplota pneumatik. Žádné z těchto dat však autor této práce neměl k dispozici. [10]



Obr. 33 Vůz Van Diemen RF-02 týmu Chabr Motorsport [12]



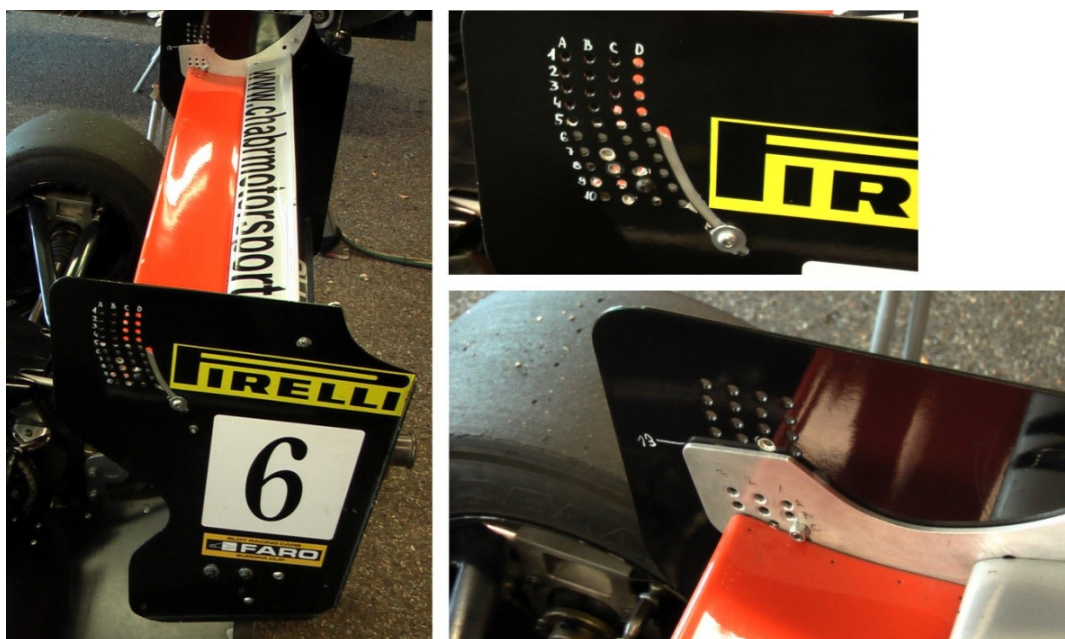
5.2 NASTAVENÍ VOZIDLA

Jak již bylo zmíněno výše, zkoušky byly prováděny pro jednotlivá nastavení vozidla. V následující tabulce je přehled nastavení vozu, pro která probíhalo měření.

Tab. 1 Přehled nastavení vozidla

Číslo nastavení	Výška přední nápravy [mm]	Výška zadní nápravy [mm]	Úhel předního spoileru [°]	Nastavení zadního spoileru
1	27	38	23	5C/1A
2	27	38	23	9A/3A
3	27	38	23	9A/3A
4	27	38	30,5	9A/3A
5	27	38	27	6B/2A
6	30	52	27	6B/2A
7	39	39	27	6B/2A
8	39	59	27	6B/2A
9	27	38	27	6B/2A

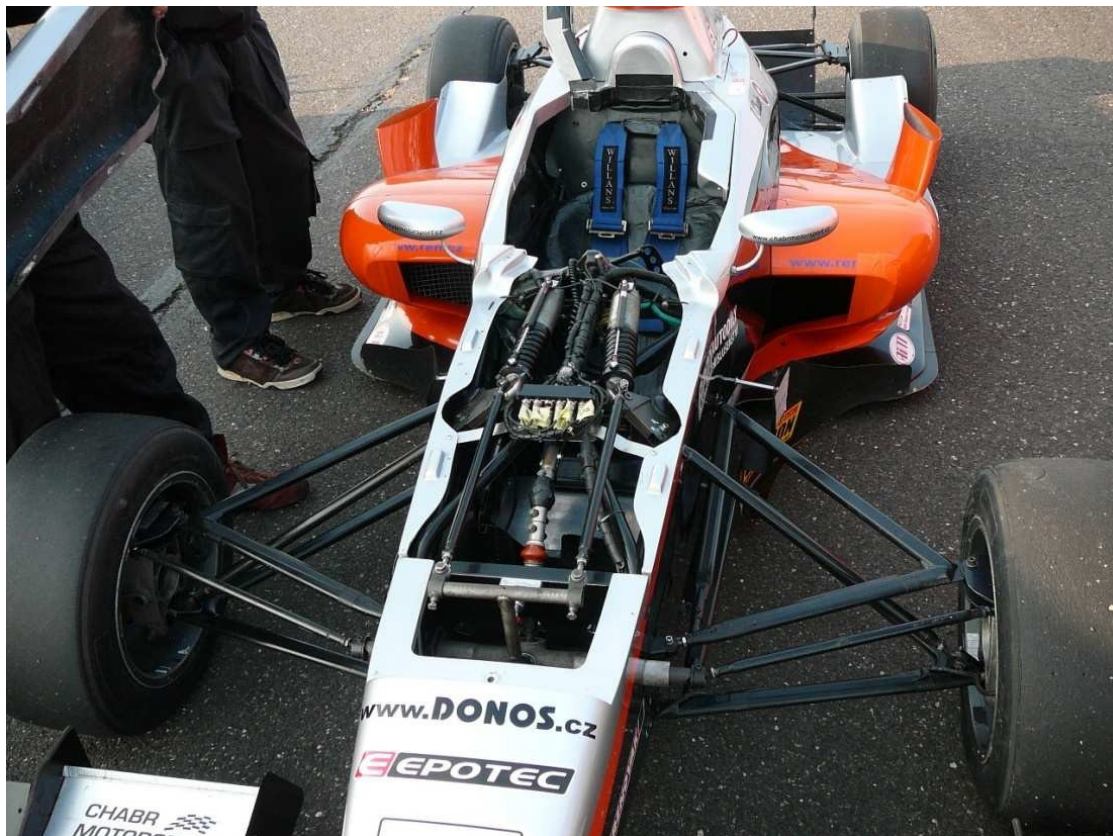
První nastavení vozu je nejběžněji používané nastavení na závodních okruzích. Druhé nastavení vozu je nastavení pro maximální přitlak. Třetí nastavení je obdobné nastavení jako předchozí, avšak s přidaným dvojitým zadním spoilerem vlastní konstrukce týmu Chabr Motorsport. Čtvrté nastavení představuje maximální nastavení předního spoileru pro jízdu na mokru a zadní dvojité křídlo. Tyto první čtyři nastavení mají sloužit k zachycení rozdílu mezi jednotlivými nastaveními předního a zadního spoileru, nastavení výšky vozidla tedy při těchto nastaveních zůstává neměnné. Nastavení pět až osm slouží k zachycení rozdílu mezi jednotlivými výškami vozidla, z toho důvodu nastavení předního a zadního spoileru zůstává neměnné. Nastavení devět potom slouží k ověření funkce difuzoru, který byl při tomto nastavení demontován. [10]



Obr. 34 Schéma nastavování zadního spoileru



Obr. 35 Zadní spoiler a difuzor [10]



Obrázek 36 Odpružení předních kol s potenciometry [10]



6 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Naměřená data byla přenesena ze záznamového zařízení AIM EVO 4 do osobního počítače, kde za pomoci programu Race Studio Analysis bylo provedeno prvotní zpracování dat. Samotné zpracování dat bylo provedeno v programu Matlab.

Prvotní úprava dat byla provedena v programu Race Studio Analysis a spočívala v rozdělení jednotlivých měřených úseků na požadované části obsahující data z dojezdových zkoušek a zkoušek za konstantní rychlosti.



Obr. 37 Rozdělení dat na úseky obsahující dojezdové zkoušky a zkoušky za konstantní rychlosti (dojezdová zkouška je označena zelenou barvou, zkouška za konstantní rychlosti je označena modrou barvou - zde se jedná o zkoušku při rychlosti 160 km/h)

Po této prvotní úpravě následoval export požadovaných dat z vybraných úseků obsahujících zkoušky do programu Microsoft Excel. Exportovaná data obsahovala čas, rychlost určenou z otáčení kola (snímanou s frekvencí 50 Hz), stlačení levého předního tlumiče (snímané s frekvencí 100 Hz), stlačení pravého předního tlumiče (snímané s frekvencí 100 Hz), podélné zrychlení určené ze změny otáčení kola (snímané s frekvencí 100 Hz), stlačení levého zadního tlumiče (snímané s frekvencí 100 Hz), stlačení pravého zadního tlumiče (snímané s frekvencí 100 Hz), rychlost určená GPS zařízením (snímaná s frekvencí 10 Hz) a zrychlení určené GPS zařízením (snímané s frekvencí 10 Hz). Data byla do programu Microsoft Excel exportována s hustotou záznamu 100 Hz.

Tab. 2 Přehled snímaných veličin exportovaných do programu Microsoft Excel - vzhledem k rozsahu dat je zobrazená tabulka zkrácena

Time [s]	Speed_LP [km/h]	LP_tlumič [mm]	PP_tlumič [mm]	podélné_G [g]	LZ_tlumič [mm]	PZ_tlumič [mm]	GPS_Speed [km/h]	GPS_LongAcc [g]
0.000	198.165	23.536	22.446	-0.161	20.906	23.243	196.768	0.106
0.010	198.240	23.406	22.272	-0.064	21.177	23.379	196.808	0.106
0.020	198.290	23.210	22.077	0.019	21.828	24.089	196.848	0.106
0.030	198.240	22.739	21.920	0.080	22.158	25.108	196.888	0.106
0.040	198.205	22.549	21.524	0.145	23.812	25.488	196.928	0.106
0.050	198.230	22.424	21.085	0.186	25.320	27.196	196.968	0.106
0.060	198.255	22.565	21.177	0.172	26.085	28.010	197.008	0.106
0.070	198.280	22.804	21.323	0.096	26.112	28.178	197.048	0.106
0.080	198.320	23.281	21.643	0.005	25.786	27.928	197.088	0.106
0.090	198.420	23.416	22.326	-0.009	25.743	27.711	197.128	0.106
0.100	198.495	23.221	22.354	0.096	25.526	27.679	197.168	0.106

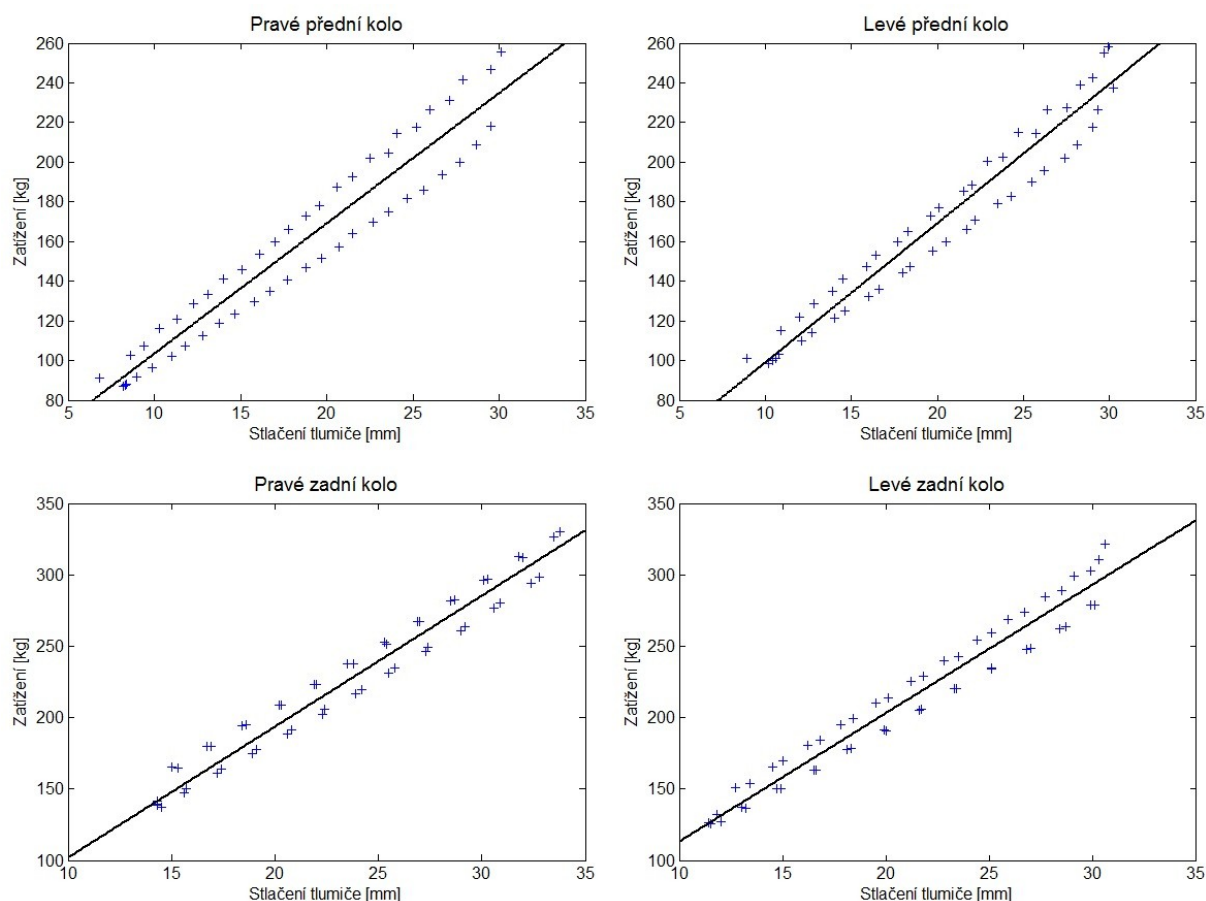
V programu Microsoft Excel byly odstraněny popisky jednotlivých sloupců a další nepotřebné informace (počet a časy jednotlivých průjezdů časovými závory), které program Race Studio Analysis s požadovanými daty exportuje. Data z dojezdových zkoušek byla



zkrácena tak, aby dojezdové zkoušky pro jedno nastavení měly vždy stejnou délku trvání. Následně byla data uložena jako datové soubory. Data z dojezdových zkoušek byla ukládána do souborů `dojezd11.dat` až `dojezd94.dat`, kde první číslice v názvu reprezentuje číslo nastavení a druhá číslice reprezentuje číslo jízdy. Data ze zkoušek za konstantní rychlosti byla ukládána do souborů `test111.dat` až `test932.dat`, kde první číslice v názvu reprezentuje číslo nastavení, druhá číslice určuje při jaké rychlosti zkouška probíhala (1 - 200 km/h, 2 - 160 km/h, 3 - 110 km/h), a poslední číslice určuje o kolikátou jízdu, se jednalo.

Dalšími zpracovávanými daty byla tabulka určující závislost mezi stlačením tlumičů a zatížením vozidla pro jednotlivá kola, která byla poskytnuta týmem Chabr Motorsport. Body získané z této tabulky byly proloženy přímkami, které charakterizují chování odpružení vozidla.

Tabulka byla získána tak, že vozidlo bylo umístěno na vahách, při sledování stlačení tlumičů a zatížení pod jednotlivými koly bylo vozidlo dvakrát stlačováno a poté postupně povolováno. Pravděpodobně kvůli pasivním odporům v zavěšení je patrný rozdíl mezi závislostí vzniklou při stlačování vozidla a závislostí vzniklou při povolování vozidla.



Obr. 38 Závislost zatížení na stlačení tlumičů pro jednotlivá kola



Rovnice pro závislost zatížení na stlačení pro pravé přední kolo:

$$Z = 6,567 * x + 37,835 \quad (31)$$

Levé přední kolo:

$$Z = 7,016 * x + 28,983 \quad (32)$$

Pravé zadní kolo:

$$Z = 8,937 * x + 16,191 \quad (33)$$

Levé zadní kolo:

$$Z = 8,908 * x + 25,552 \quad (34)$$

kde Z reprezentuje zatížení a x reprezentuje stlačení tlumiče.

6.1 DOJEZDOVÁ ZKOUŠKA - POROVNÁNÍ METOD ZPRACOVÁNÍ DAT

Cílem zpracování dat z dojezdových zkoušek bylo získání průběhu závislosti zpomalení na rychlosti vozidla pro jednotlivá nastavení vozu a získání průběhu závislosti zatížení jednotlivých kol na rychlosti pro jednotlivá nastavení vozu. Veškerá porovnávání metod zpracování dat byla prováděna pro několik nastavení, zobrazované grafy platí pro první jízdu pátého nastavení.

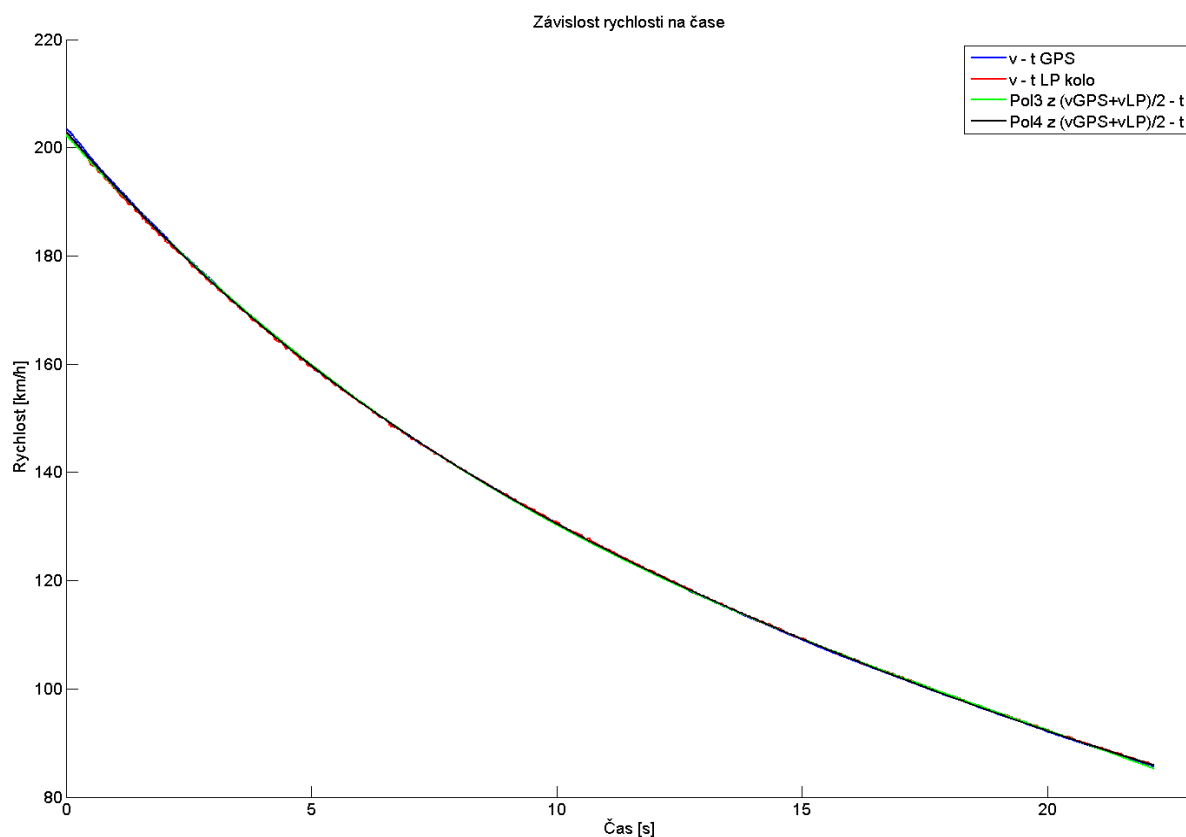
6.1.1 ZÁVISLOST ZRYCHLENÍ NA RYCHLOSTI

Nejprve byly porovnávány průběhy závislosti rychlosti vozidla na čase - samotné průběhy dojezdových zkoušek. Srovnáván byl průběh rychlosti (v) na čase (t) získaný několika způsoby označovanými následujícím způsobem:

- GPS - data získaná pomocí zařízení GPS
- LP kolo (LP) - data získaná ze snímání otáček kola
- Pol3 - závislost proložena polynomem třetího stupně (analogické označování polynomů jiných stupňů - např. polynom čtvrtého stupně: Pol4)

Byly srovnávány závislosti získané z dat ze zařízení GPS, závislosti získané z průběhu otáček kola a závislosti získané proložením polynomu třetího a čtvrtého stupně závislostí rychlosti na čase získanou zprůměrováním dat z GPS a otáčení kola.

Ze srovnání (viz následující strana) je zřejmé, že mezi jednotlivými průběhy závislosti rychlost - čas jsou velmi malé rozdíly. Při bližším zkoumání však bylo zjištěno, že křivky z dat z GPS a kola nemají hladký průběh a velmi mírně se liší. Dále bylo zjištěno, že křivka polynomu třetího stupně z průměru GPS a kola nekopíruje jednotlivé křivky z GPS a z kola tak věrně jako křivka polynomu čtvrtého stupně.

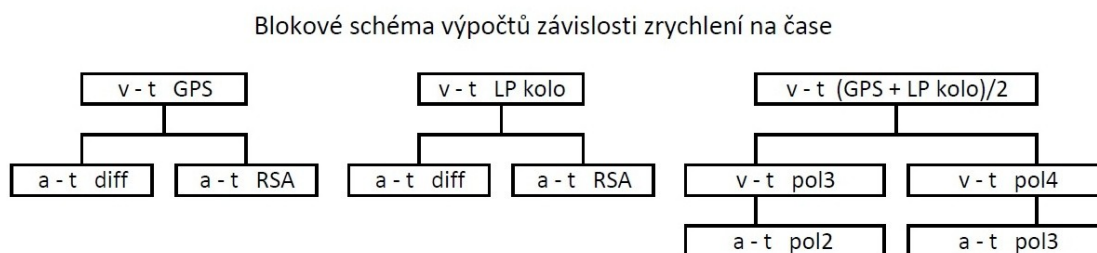


Obr. 39 Porovnání závislosti rychlosti na čase. Zobrazení platí pro první jízdu nastavení 5

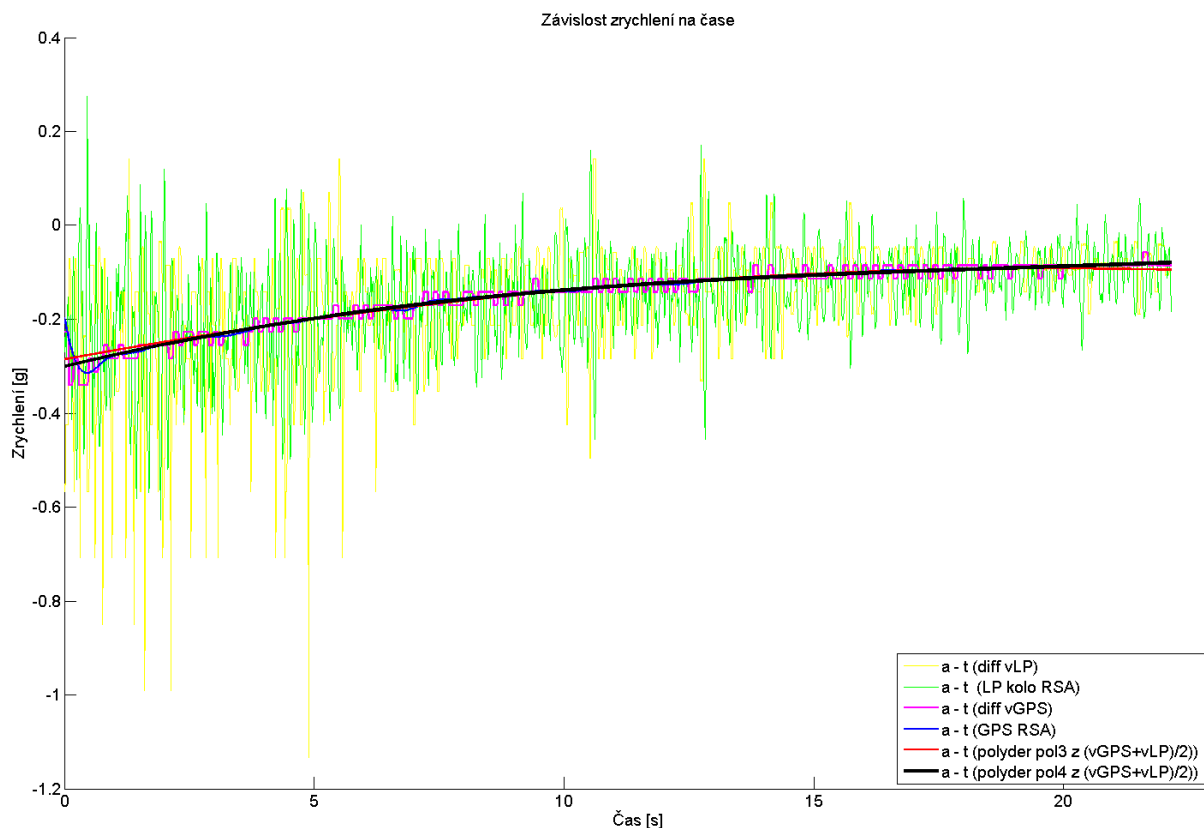
Následně byly porovnávány průběhy závislosti zrychlení vozidla během dojezdové zkoušky na čase. Tyto průběhy zrychlení na čase byly získávány několika způsoby, které budou dále zejména v blokových schématech a popiscích grafů označovány následovně:

- RSA - data získaná z programu Race Studio Analysis
- diff - numerická derivace provedená v programu Matlab
- polyder - symbolická derivace provedená v programu Matlab

Byly porovnány závislosti zrychlení na čase z dojezdové zkoušky získané přímo z programu Race Studio Analysis, a to jak z dat z GPS, tak z dat z otáčení kola, závislosti získané numerickou derivací závislosti rychlosti na čase v programu Matlab pro data z GPS i pro data z otáčení kola a závislosti získané symbolickou derivací polynomů třetího a čtvrtého stupně ze závislosti rychlosti na čase v programu Matlab. Systém jakým byla data zpracována je znázorněn v blokovém schématu:



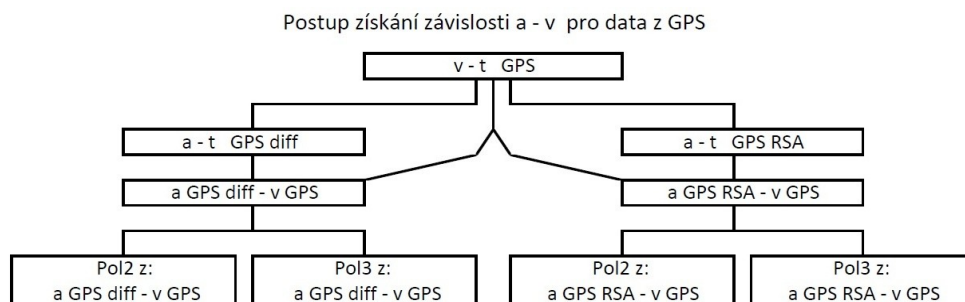
Obr. 40 Blokové schéma výpočtů závislosti zrychlení vozidla na čase v průběhu dojezdové zkoušky



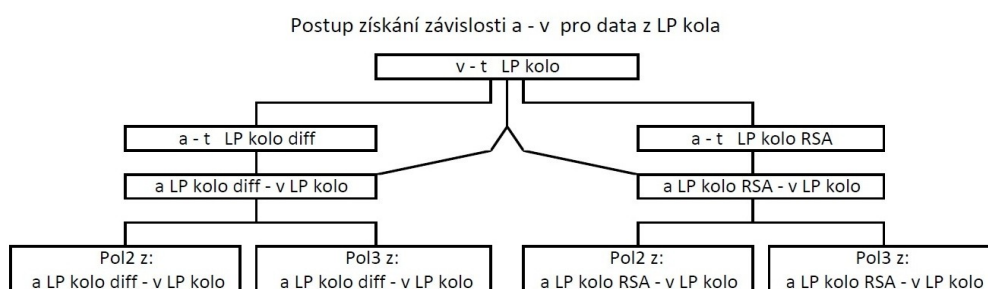
Obr. 41 Porovnání závislostí zrychlení na čase při průběhu dojezdové zkoušky první jízdy při nastavení 5

Z porovnání je patrné, že závislosti zrychlení - čas z dat z otáčení kola jak z programu RSA, tak z numerické derivace závislosti rychlost - čas, jsou značně rozšuměné a pro další zpracovávání se nehodí. Závislost vzniklá numerickou derivací závislosti rychlost - čas z GPS se svým charakterem pro další zpracování též nehodí. GPS závislost z RSA má již věrohodnější průběh, avšak stále je možno tvrdit, že poměrně nevhodný. Zbývají tedy průběhy vzniklé symbolickou derivací polynomů třetího a čtvrtého stupně ze závislosti rychlost - čas, z nichž jako vhodnější se jeví ten, získaný derivací polynomu čtvrtého stupně závislosti rychlost - čas (tedy polynom třetího stupně závislosti zrychlení - čas).

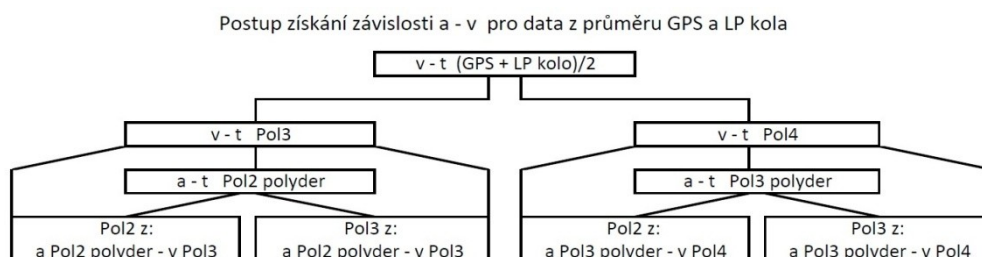
Poté následovalo porovnání závislostí zrychlení - rychlost získaných jako kombinace vybraných závislostí zrychlení - čas a rychlost - čas a jejich proložení polynomy různých stupňů. Byly vytvořeny závislosti zrychlení z GPS z RSA na rychlosti z GPS, zrychlení z GPS vzniklé numerickou derivací v Matlabu na rychlosti z GPS, zrychlení z kola z RSA na rychlosti z kola, zrychlení z kola vzniklé numerickou derivací v Matlabu na rychlosti z kola. Všechny takto vzniklé závislosti byly proloženy polynomy druhého a třetího stupně. Dále byly vytvořeny závislosti proložené polynomem druhého a třetího stupně a to z polynomu druhého stupně zrychlení vzniklém symbolickou derivací polynomu třetího stupně rychlosti na polynomu třetího stupně rychlosti a z polynomu třetího stupně zrychlení vzniklém symbolickou derivací polynomu čtvrtého stupně rychlosti na polynomu čtvrtého stupně rychlosti. Pro zpřehlednění jsou na následující straně zobrazena bloková schémata.



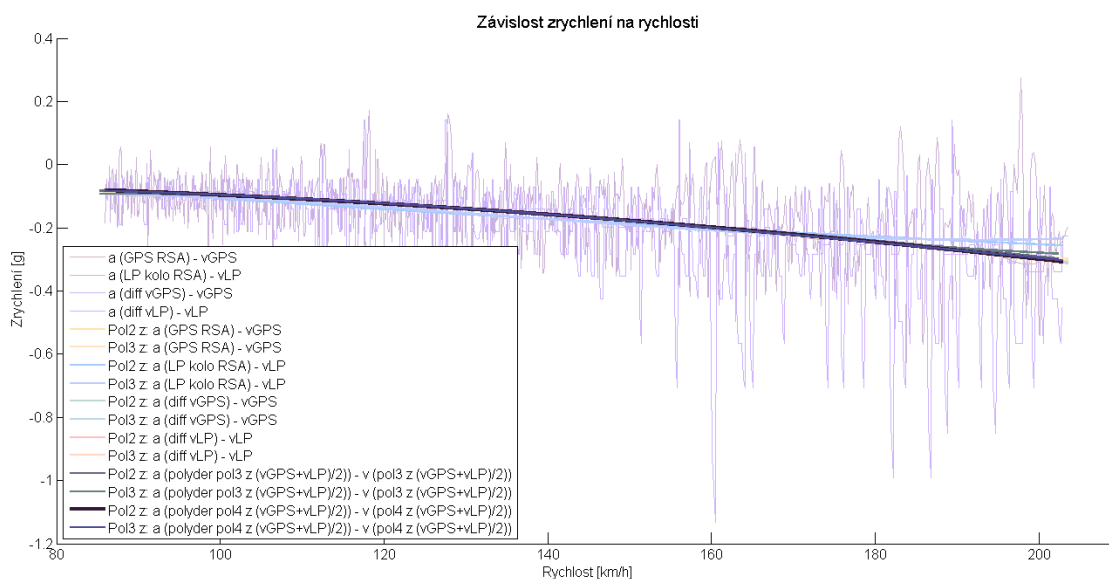
Obr. 42 Blokové schéma postupu určení závislosti zrychlení na rychlosti pro data z GPS



Obr. 43 Blokové schéma postupu určení závislosti zrychlení na rychlosti pro data z kola



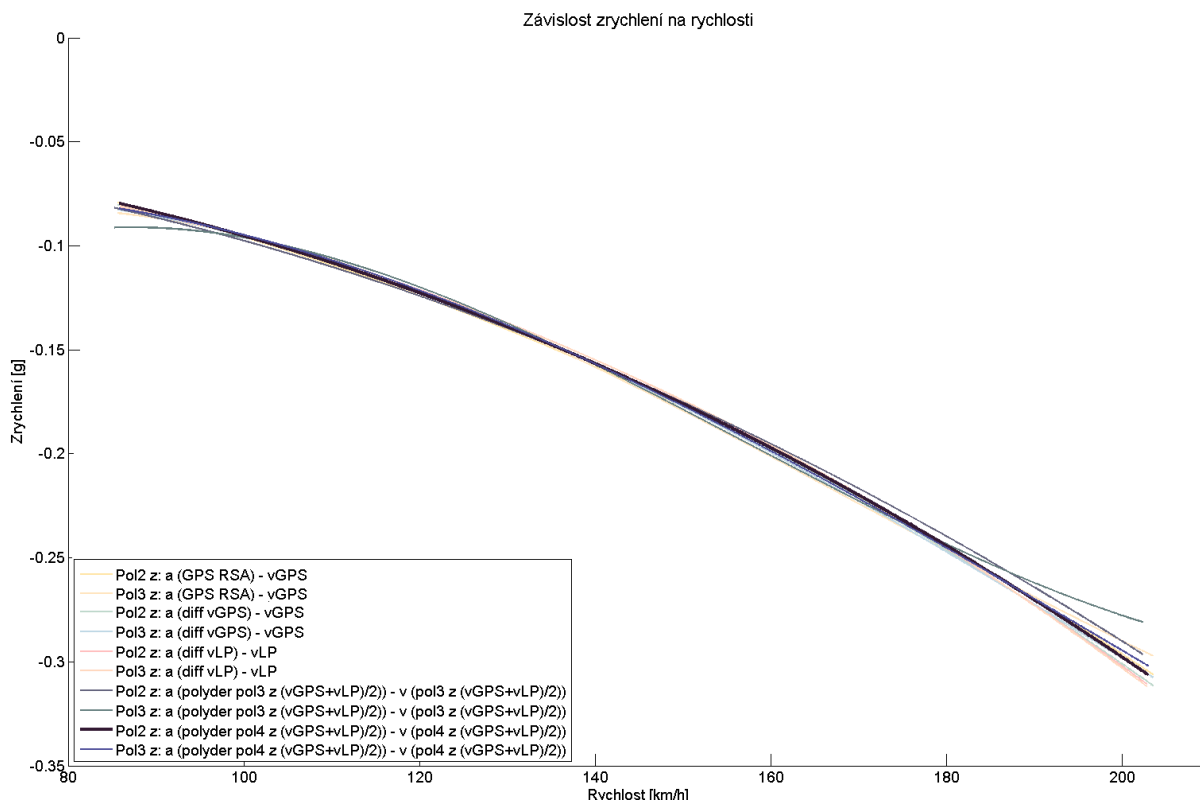
Obr. 44 Blokové schéma postupu určení závislosti zrychlení na rychlosti pro data z průměru dat z kola a GPS



Obr. 45 Porovnání průběhů závislosti zrychlení na rychlosti dojezdové zkoušky - nastavení 5

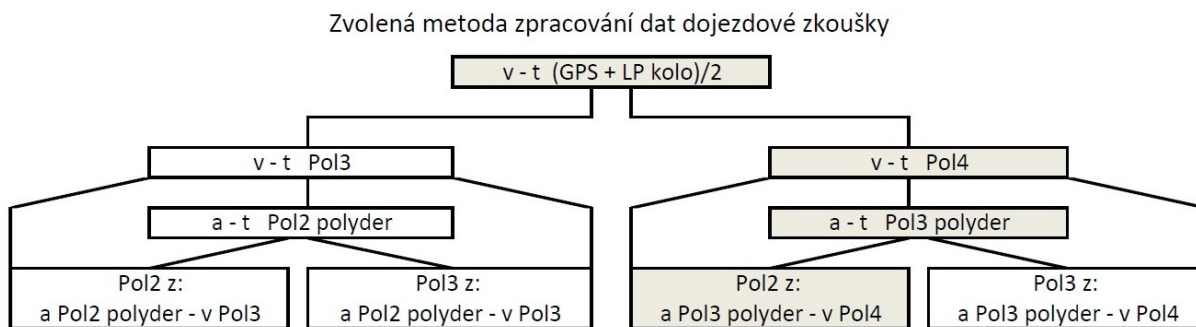


Z bližšího porovnání průběhů závislostí zrychlení na rychlosti dojezdové zkoušky je patrné, že závislosti získané z dat z kola jsou značně rozšuměné a polynomy druhého a třetí stupně z dat z kola z RSA neodpovídají teoretickým předpokladům, stejně jako závislosti získané GPS. Ostatní průběhy jsou si podobné, přičemž teoretickým předpokladům lépe odpovídají průběhy proložené polynomem druhého stupně.



Obr. 46 Porovnání vybraných průběhů zrychlení na rychlosti dojezdové zkoušky - nastavení 5

Jako nejvhodnější se jeví polynom druhého stupně ze závislosti polynomu třetího stupně zrychlení získaného symbolickou derivací polynomu čtvrtého stupně rychlosti na polynomu čtvrtého stupně rychlosti, který je v obrázcích znázorněn silnější čarou. Při samotném vyhodnocování dat jízdních testů budou tedy data zpracována tímto způsobem, který je vyznačen v následujícím blokovém schématu.



Obr. 47 Zvolená metoda zpracování dat z dojezdové zkoušky pro získání závislosti zrychlení - rychlost



Protože pro většinu nastavení bylo prováděno po čtyřech dojezdových zkouškách, výstupem pro jedno nastavení byly čtyři polynomy druhého stupně závislosti zrychlení na rychlosti. Aby bylo možné jednotlivá nastavení vozu mezi sebou jednoduše porovnávat, byl pro každé nastavení vypočítán průměrný polynom závislosti zrychlení - rychlost. Samotné výpočty probíhaly tak, že byl nejprve určen celkový polynom čtvrtého stupně (průměr ze čtyř dílčích pro jednotlivé jízdy) závislosti rychlosti na čase, celkový polynom třetího stupně závislosti zrychlení na čase, a závislost těchto dvou celkových křivek byla proložena polynomem druhého stupně. Celkový polynom byl získán zprůměrováním jednotlivých koeficientů dílčích polynomů.

Dílčí polynomy zrychlení:

$$a_1(v) = A_1 * v^3 + B_1 * v^2 + C_1 * v + D_1 \quad (35)$$

$$a_2(v) = A_2 * v^3 + B_2 * v^2 + C_2 * v + D_2 \quad (36)$$

Celkový polynom zrychlení

$$a(v) = (A_1 + A_2)/2 * v^3 + (B_1 + B_2)/2 * v^2 + (C_1 + C_2) * v + (D_1 + D_2)/2 \quad (37)$$

kde v reprezentuje rychlost, a zrychlení a A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 a C_2 reprezentují jednotlivé koeficienty polynomu.

Koeficienty celkových polynomů závislosti zrychlení na rychlosti pro všechna nastavení jsou uvedeny v první tabulce přílohy A.

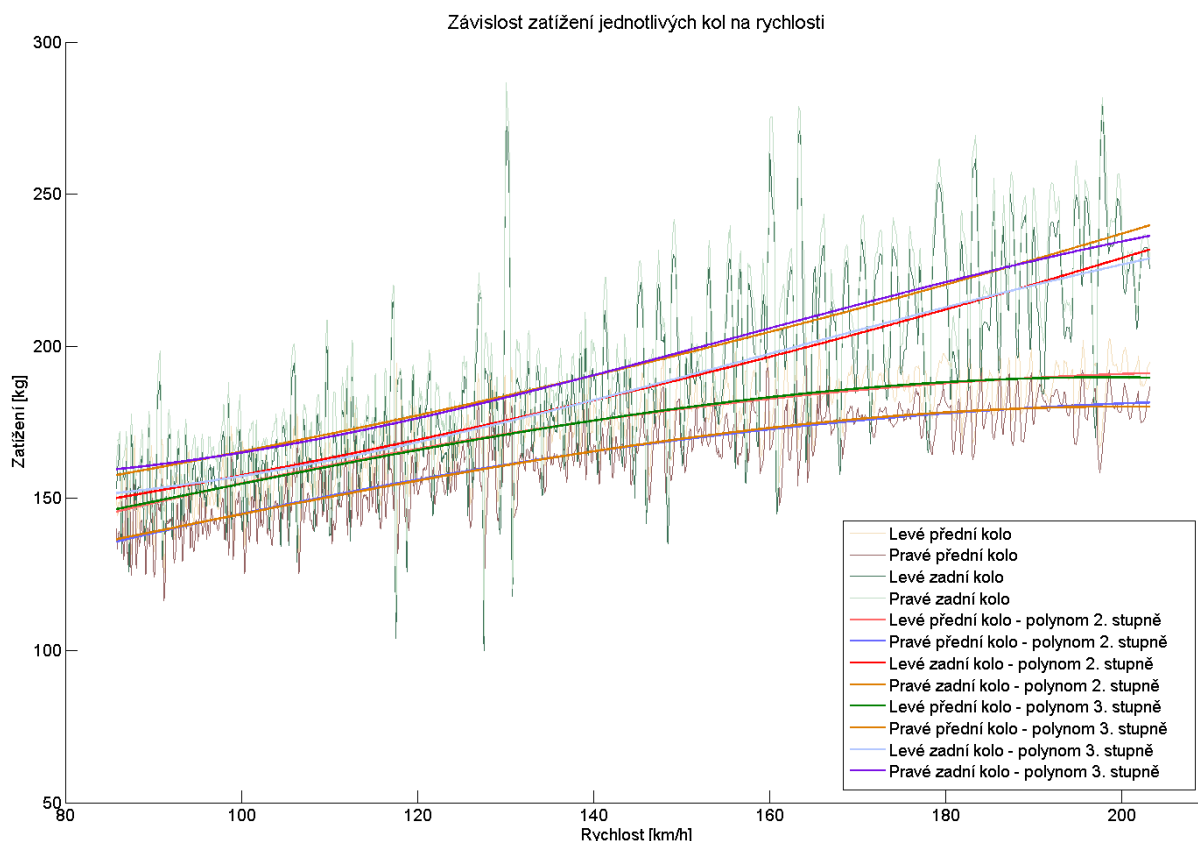
6.1.2 ZÁVISLOST ZATÍŽENÍ NA RYCHLOSTI

Dalším výstupem z dojezdové zkoušky byla závislost zatížení kol na rychlosti vozidla. V tomto případě již nebylo nutné nijak výrazně upravovat závislost rychlosti na čase, proto je v této kapitole uvažována rychlost z kola. Dále ve vyhodnocování jednotlivých zkoušek bude uvažován průměr ze závislosti rychlosti na čase z GPS a z kola.

Zatížení jednotlivých kol bylo ze snímaného stlačení tlumičů přepočítáváno pomocí vztahů 32, 33, 34 a 35.

Z porovnání zobrazeného na další straně je patrné, že závislosti zatížení na rychlosti pro jednotlivá kola nejsou vhodné pro další zpracování a to pravděpodobně z důvodu ne zcela dokonalého povrchu testovací trati. Z tohoto důvodu byly závislosti pro jednotlivá kola proloženy polynomy druhého a třetího stupně. Při bližším porovnávání jednotlivých polynomů bylo zjištěno, že prokládání závislosti polynomem druhého stupně se jeví jako vhodnější.

Z porovnání je též zřejmé, že kola na jedné nápravě nejsou stejně zatížena - na přední nápravě je více zatíženo levé kolo, zatímco na zadní nápravě je více zatíženo pravé kolo. Z důvodu zjednodušení bude dále uvažováno průměrné zatížení kola přední nápravy a průměrné zatížení kola zadní nápravy vypočtené jako průměr ze dvou polynomů stejným způsobem jako celková závislost zrychlení na rychlost v předchozí kapitole.



Obr. 48 Závislost zatížení jednotlivých kol na rychlosti dojezdové zkoušky pro nastavení 5

Při zpomalování vozidla dochází k přitěžování přední nápravy a odlehčování zadní nápravy (tzv. load transfer). Tento efekt je nežádoucí při vyhodnocování dat z dojezdové zkoušky, proto bylo nutné jej eliminovat.

Vztahy určující změnu zatížení pro kola jednotlivých náprav v důsledku zrychlení vozidla:

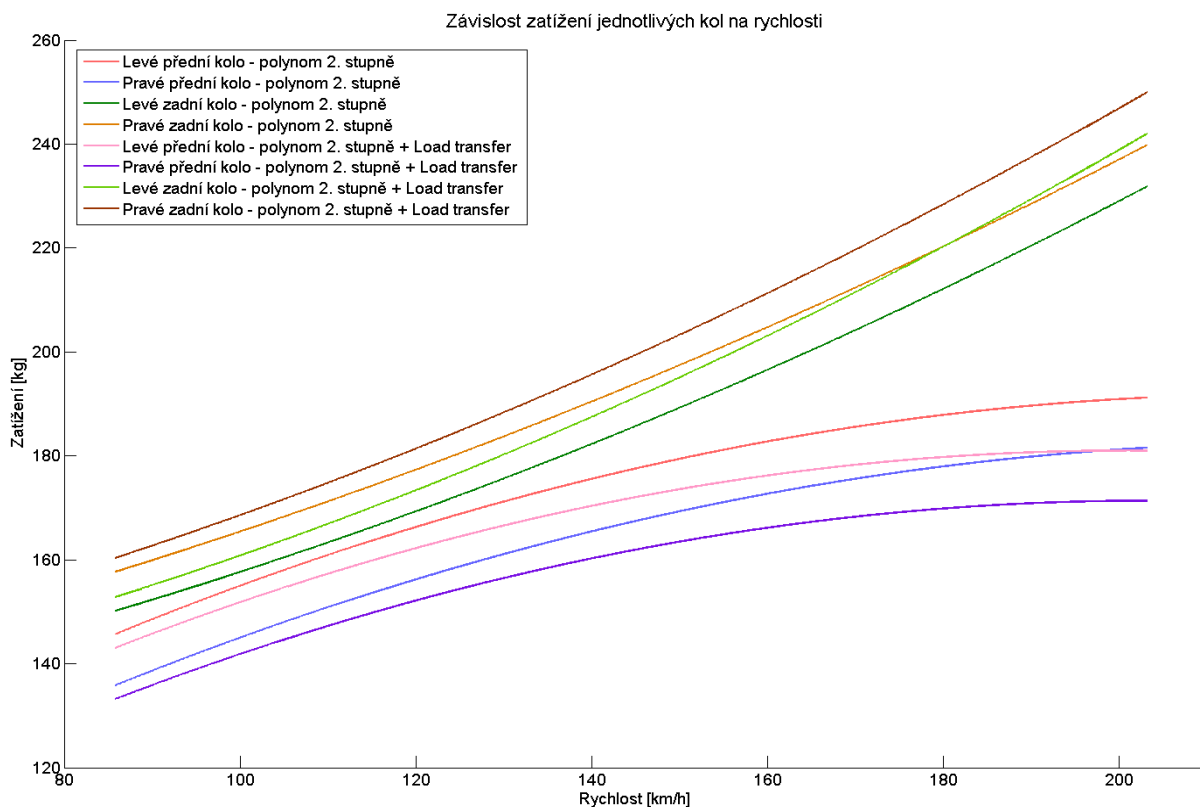
$$W_f = \left(-W * \frac{h}{l} * \frac{a}{g} \right) / 2 \quad (38)$$

$$W_r = \left(W * \frac{h}{l} * \frac{a}{g} \right) / 2 \quad (39)$$

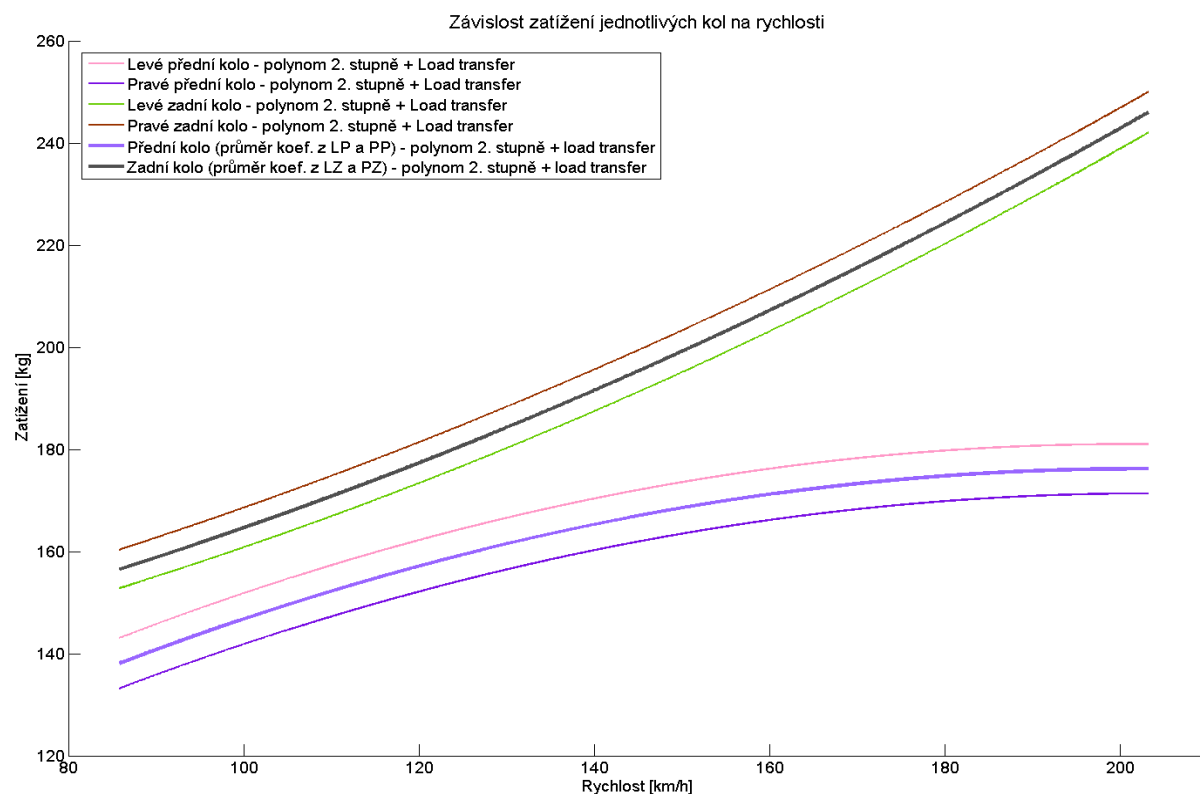
kde W představuje celkovou hmotnost vozidla, W_f reprezentuje změnu zatížení přední nápravy, W_r změnu zatížení zadní nápravy, h udává výšku těžiště vozidla, l udává rozvor vozidla, a je zrychlení vozidla a g je gravitační zrychlení.

Pro eliminaci vlivu load transferu byly jednotlivé změny zatížení v důsledku zrychlení odečítány od celkového zatížení kola.

Vzhledem k tomu, že autor této práce nemá k dispozici údaj o výšce těžiště vozidla, byla do výpočtu zvolena hodnota $h = 0,3$ m, která odpovídá hodnotě typické pro tento typ vozidla.



Obr. 49 Závislost zatížení na rychlosti pro jednotlivá kola z dojezdové zkoušky při uvažování load transferu a bez něj - nastavení 5



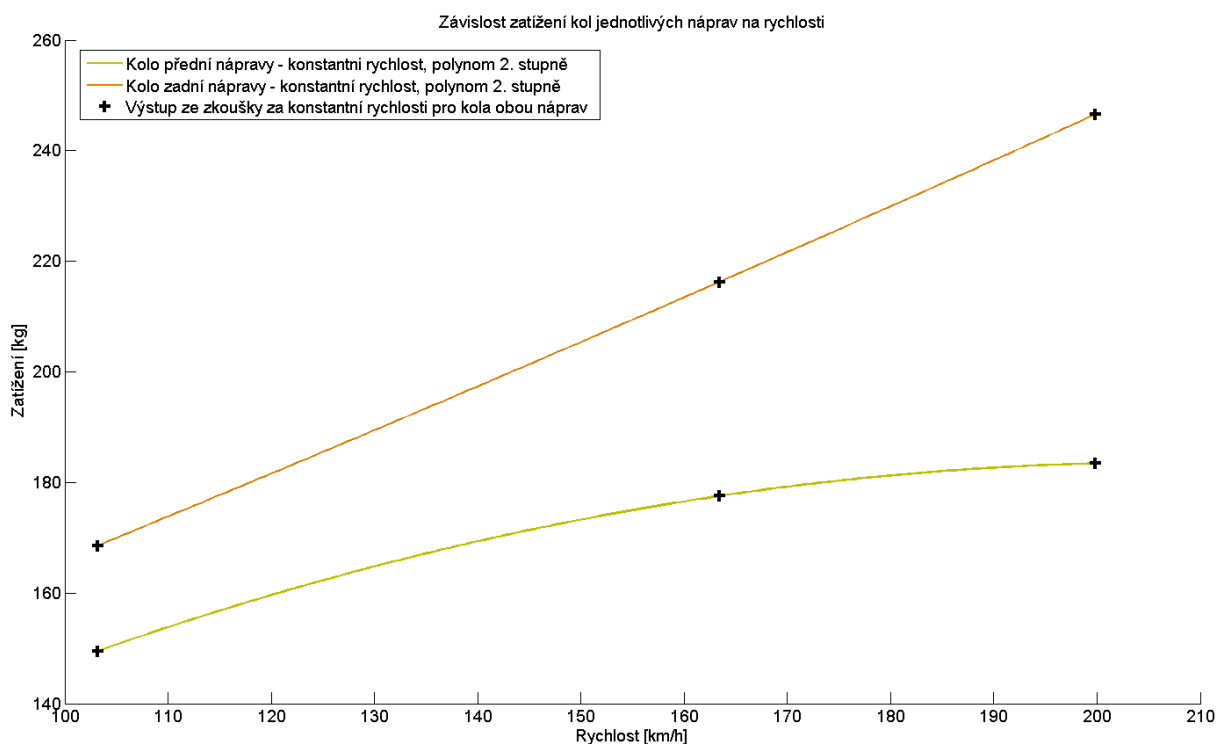
Obr. 50 Výsledné průběhy závislosti zatížení na rychlosti pro kolo přední a zadní nápravy a průběhy pro jednotlivá kola - dojezdová zkouška, nastavení 5



6.2 ZKOUŠKA ZA KONSTANTNÍ RYCHLOSTI - POROVNÁNÍ DAT

Cílem zpracování dat ze zkoušky za konstantní rychlosti je získání průběhu závislosti zatížení kol na rychlosti. Zkouška za konstantní rychlosti pro jedno nastavení vozu byla provedena pomocí šesti jízd, které probíhaly při rychlostech přibližně 200 km/h, 160 km/h a 110 km/h, pro každou rychlost proběhly dvě jízdy (po jedné jízdě v každém směru). Nejprve byla vypočtena průměrná rychlost (opět ze závislosti rychlosti na čase získané jako průměr rychlosti z LP kola a GPS) a průměrné stlačení tlumičů jednotlivých kol pro každou jízdu, ze kterých bylo určeno zatížení jednotlivých kol pro danou jízdu. Poté byly vypočteny průměrné hodnoty rychlosti a zatížení z obou jízd pro každou rychlost. Nakonec bylo vypočteno zatížení kola na nápravě jako průměrná hodnota zatížení z levého a pravého kola na nápravě.

Výstupem z této úpravy dat jsou tři hodnoty rychlosti a jim odpovídající tři hodnoty zatížení kol pro každou nápravu pro jedno nastavení. Pro získání průběhu závislosti zatížení kol na rychlosti byla tato data proložena polynomem druhého stupně.

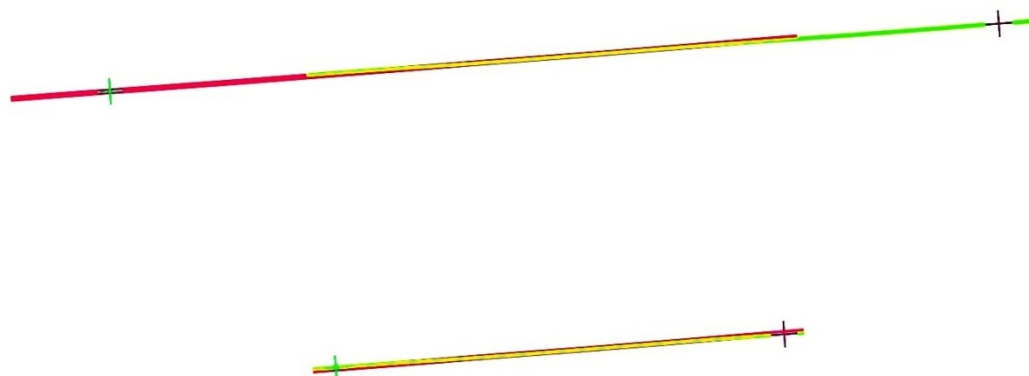


Obr. 51 Závislost zatížení kol přední a zadní nápravy z zkoušky za konstantní rychlosti, nastavení 5

6.2.1 KOREKCE VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY ZA KONSTANTNÍ RYCHLOSTI POMOCÍ GPS

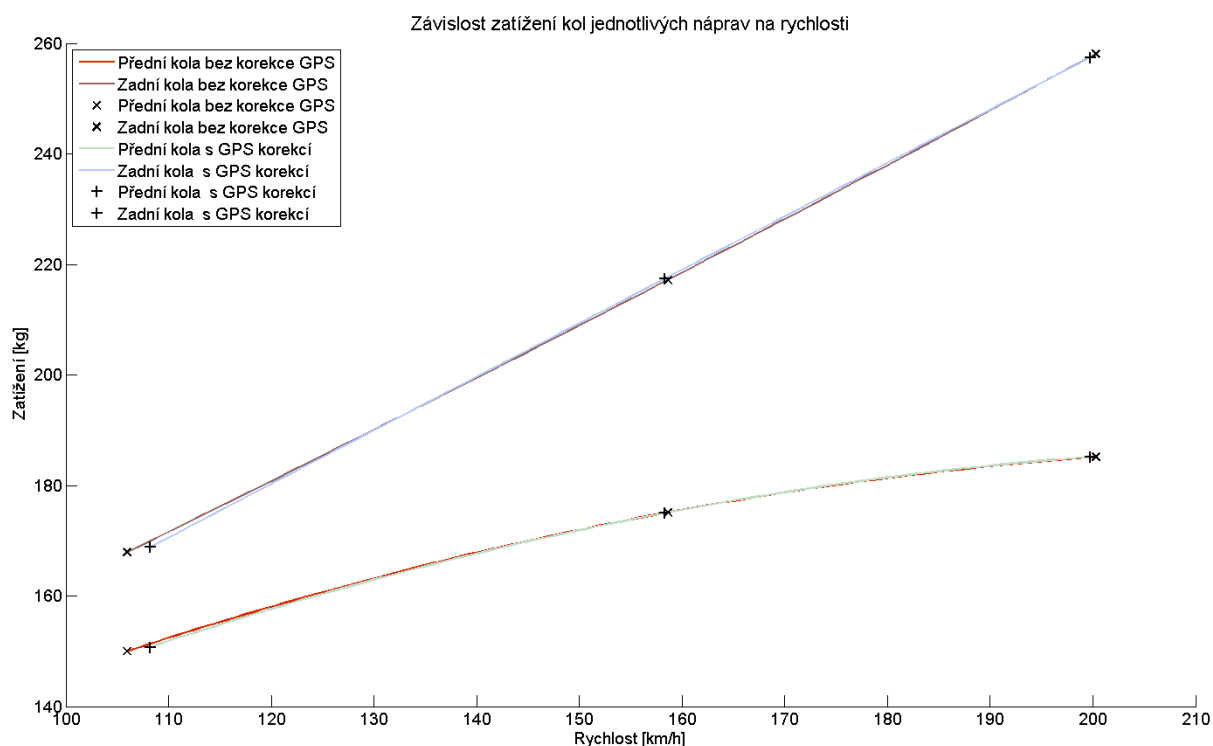
Vzhledem k tomu, že při zpracování zkoušky za konstantní rychlosti nebyl uvažován vliv nestejnorodosti trati, bylo provedeno porovnání výsledků pro případ, že bude brán v potaz pouze úsek trati, který vozidlo projelo oběma směry a pro případ, kdy byly brány v potaz celé úseky trati jednotlivých jízd.

Na obrázku na další straně je znázorněno porovnání záznamu GPS z „neupravené trati“ a trati upravené tak, aby se úseky trati projeté oběma směry překrývaly.



Obr. 52 Porovnání GPS záznamu zkoušky za konstantní rychlosti při rychlosti 200 km/h, nastavení 8. Nahoře jsou neupravená data, dole upravená.

Bylo provedeno srovnání průběhů závislosti zatížení na rychlosti pro osmé nastavení vozu. Výsledek je zobrazen na následujícím obrázku, ze kterého je patrné, že průběhy závislosti zatížení na zrychlení jsou pro korigovaná i nekorigovaná data velmi podobné. Dále je zřejmé, že zkrácením dat dojde ke změně průměrných rychlostí jednotlivých dojezdových zkoušek, což je dáno tím, že při prováděných dojezdových zkouškách nebyla udržována zcela konstantní rychlost. Díky tomuto faktu není možné přesně určit, jaký je ve skutečnosti vliv nestejnorodosti trati, kvůli kterému bylo porovnání prováděno, nicméně vzhledem k podobnosti korigovaných a nekorigovaných průběhů lze předpokládat, že je zanedbatelný.



Obr. 53 Porovnání závislosti zatížení na rychlosti pro data korigovaná a nekorigovaná pomocí GPS

Z tohoto důvodu a též kvůli tomu, aby nebylo zmenšováno množství dat, ze kterých zkouška za konstantní rychlosti vychází, nebude v dalším zpracování prováděna GPS korekce.

6.2.2 ZHODNOCENÍ PŘESNOSTI URČENÍ ZATÍŽENÍ JEDNOTLIVÝCH KOL

Požadovaným výstupem ze zkoušek za konstantní rychlosti je závislost zatížení kol na přední a zadní nápravě na rychlosti vozidla. Otázkou je, jak přesný je přepočet zatížení kola ze stlačení tlumiče. Z obrázku 39 je vidět, že byly naměřeny rozdílné hodnoty zatížení pro stejné stlačení při stlačování a následném povolování vozidla.

Samotné zhodnocení přesnosti určení zatížení bylo prováděno tak, že byla vybrána data před, nebo po provedení jízdních testů pro dané nastavení, kdy vozidlo bylo v klidu a bylo obsazeno jezdce (tým Chab Motorsport byla poskytnuta informace, že vozidlo s jezdce a doplněnými provozními kapalinami váží 540,5 kg, zatížení kola přední nápravy je 121,25 kg a zatížení kola zadní nápravy je 149 kg). Bylo určeno průměrné stlačení tlumičů z vybraných dat, které bylo následně přepočítáno na zatížení jednotlivých kol. Toto zatížení bylo následně sečteno, čímž byla získána aktuální hmotnost vozidla. Data byla ukládána do následující tabulky:

Tab. 3 Srovnání zatížení kola hmotnosti vozidla před či po jednotlivých jízdních testech

Číslo nastavení	Poznámka	Zatížení PP kola [kg]	Zatížení LP kola [kg]	Zatížení PZ kola [kg]	Zatížení LZ kola [kg]	Celkové zatížení
1	Před měřením	122,05	123,79	138,87	135,32	520,03
2	Před měřením	127,54	127,95	144,41	140,53	540,43
3	Před měřením	122,04	121,18	142,27	140,15	525,64
4	Před měřením	119,58	122,46	144,50	141,46	528,00
5	Před měřením	120,54	123,56	141,51	137,87	523,48
5	Po měření	120,98	128,75	145,29	135,33	530,35
6	Před měřením	128,07	130,60	138,87	137,57	535,11
7	Před měřením	128,32	134,04	141,34	137,36	541,06
8	Před měřením	127,80	132,97	140,26	135,53	536,56
8	Po měření	131,06	115,63	125,25	141,82	513,76
9	Před měřením	124,83	131,66	143,54	140,01	540,04

kde *PP* představuje pravé přední, *LP* levé přední, *PZ* pravé zadní a *LZ* levé zadní kolo.

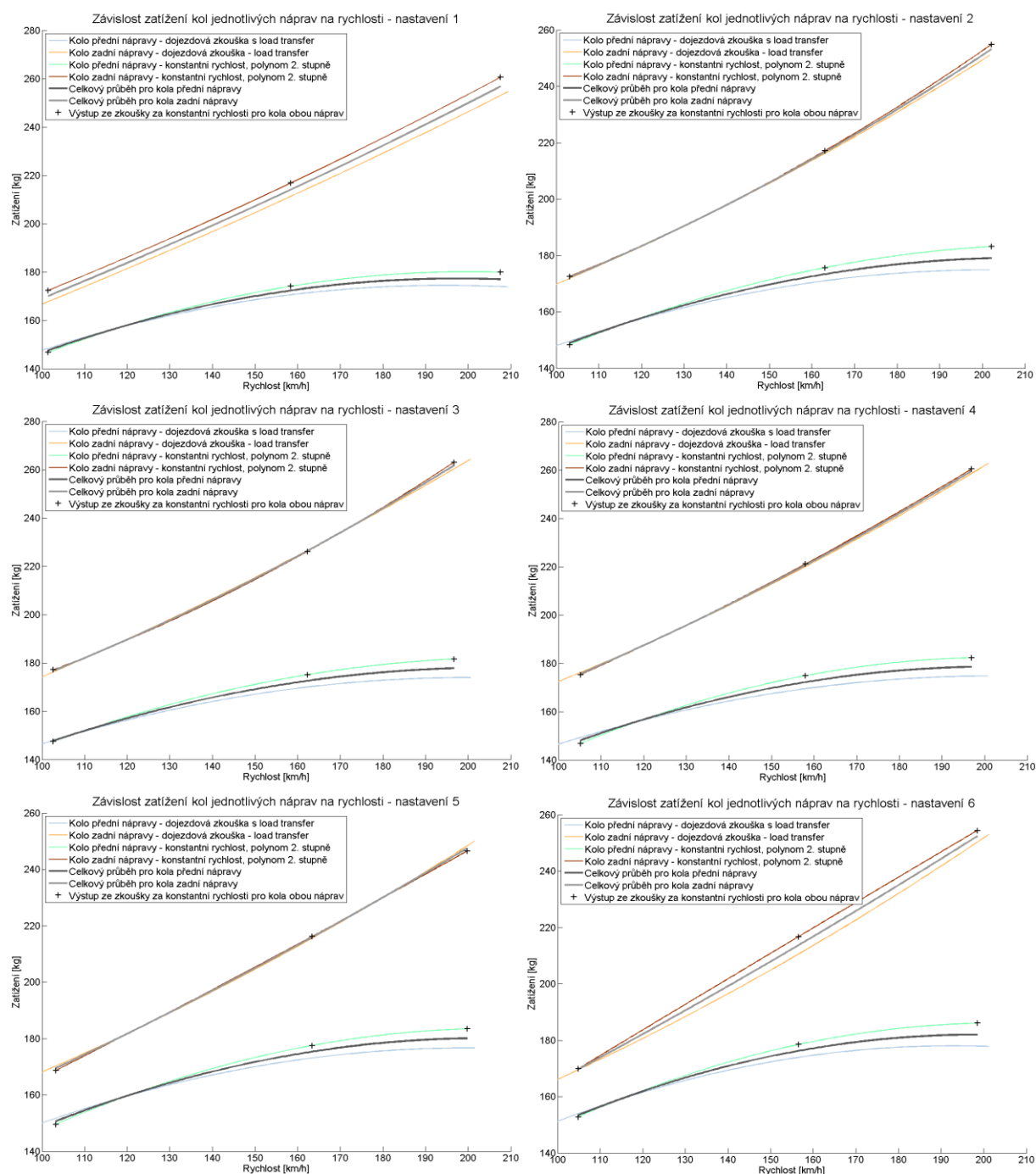
Z tabulky je patrné, že rozdíl mezi maximální a minimální hmotností získanou ze zatížení kol činí zhruba 30 kg a není pozorovatelná jakákoli závislost hmotnosti na průběhu jízdy například z důvodu ubývání paliva v nádrži, což značí, že vliv pasivních odporů v zatížení může být poměrně velký a u stojícího vozidla může hrát poměrně výraznou roli. V případě, že je vozidlo v pohybu a jede po nerovné vozovce, dochází k pohybu zavěšení, při kterém by tyto pasivní odpory neměly mít takový vliv jako při stojícím vozidle.

Za povšimnutí též stojí, že pro nastavení jedna až osm vychází ve většině případů nižší hmotnost než jaká byla získána vážením, zatímco pro nastavení devět vychází hmotnost zjištěná ze zatížení 540 kg, avšak při tomto nastavení by vozidlo mělo vážit 534,5 kg a to proto, že při tomto nastavení byl z vozidla odmontován difuzor o hmotnosti 6 kg.

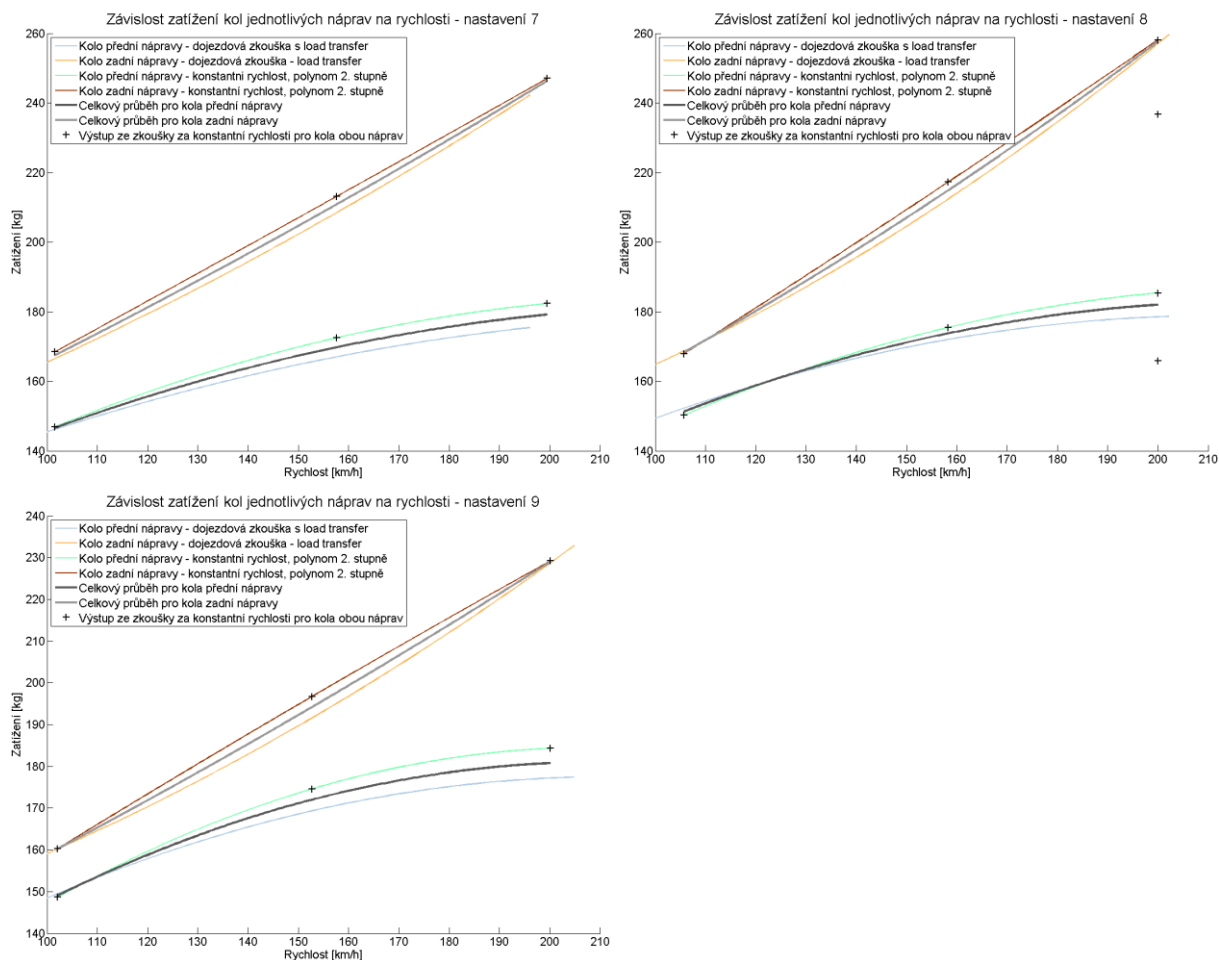


6.3 CELKOVÁ ZÁVISLOST ZATÍŽENÍ KOL NA RYCHLOSTI

Výstupem z dojezdových zkoušek i ze zkoušek za konstantní rychlosti jsou závislosti zatížení kol na rychlosti vozidla. Tyto závislosti mají jak z dojezdové zkoušky, tak ze zkoušky za konstantní rychlosti, tvar polynomu druhého stupně. Aby byla získána pouze jedna tato závislost pro jedno nastavení vozu, bylo provedeno zprůměrování polynomů z jednotlivých zkoušek pro dané nastavení (získání průměrného polynomu bylo prováděno průměrováním jednotlivých koeficientů polynomů dle vztahů 36, 37 a 38).



Obr. 54 Srovnání celkového průběhu závislosti zatížení kol na rychlosti s průběhy z dojezdových zkoušek a zkoušek za konstantní rychlosti pro nastavení 1 - 6



Obr. 55 Srovnání celkového průběhu závislosti zatížení kol na rychlosti s průběhy z dojezdových zkoušek a zkoušek za konstantní rychlosti pro nastavení 7 - 9

Ze srovnání průběhů zatížení na rychlosti z dojezdové zkoušky a ze zkoušky za konstantní rychlosti pro všechna nastavení je patrné, že s narůstající rychlostí vzrůstá rozdíl mezi průběhy z dojezdové zkoušky a ze zkoušky za konstantní rychlosti na přední nápravě. Přičemž pro zkoušku za konstantní rychlosti vychází vyšší zatížení kol, což by mohlo být způsobeno rozdílným nakloněním vozidla v důsledku load transferu, což bude vyhodnoceno dále v této práci, nebo v důsledku nepřesně vypočteného load transferu kvůli nedostupné informaci o výšce těžiště vozidla.

Při porovnání závislosti zatížení na rychlosti kola zadní nápravy je patrné, že závislosti z dojezdové zkoušky i ze zkoušky za konstantní rychlosti pro druhé až páté nastavení jsou téměř totožné. Pro první nastavení je vidět, že křivky z dojezdové zkoušky i ze zkoušky za konstantní rychlosti sice jsou vůči sobě posunuté, mají však velmi podobný trend. Naopak pro šesté až deváté nastavení je patrný rozdíl ve tvaru křivky mezi dojezdovou zkouškou a zkouškou za konstantní rychlosti. Je vidět, že křivky se při rychlosti okolo 100 km/h a 200 km/h protínají, největší rozdíl je při rychlostech okolo 160 km/h. To je patrné dáno tím, že zatímco pro první až páté nastavení probíhaly všechny zkoušky za konstantní rychlosti na celém úseku trati, tak pro šesté až deváté nastavení byly zkoušky za konstantní rychlosti pro rychlosti 110 km/h a 160 km/h prováděny během jedné jízdy. Zkoušky za konstantní rychlosti při 160 km/h tedy byly prováděny pouze na polovině měřeného úseku trati, čímž bylo patrně ovlivněno zatížení kol zadní nápravy.



V dalším zpracování budou užity celkové průběhy závislosti zatížení na stlačení pro kola jednotlivých náprav. Koeficienty těchto polynomů jsou uvedeny ve druhé a třetí tabulce přílohy A.

VLIV ROZDÍLU NAKLONĚNÍ VOZIDLA MEZI JEDNOTLIVÝMI ZKOUŠKAMI

Tato podkapitola se zabývá vyhodnocením, zda změna zatížení kol jednotlivých náprav může mít takový vliv na stlačení tlumičů a pružin, že vozidlo bude v jiné poloze vůči směru proudění obtékajícího vzduchu než v případě zkoušky za konstantní rychlosti.

Výpočet byl proveden v programu Matlab tak, že nejprve byly zvoleny tři hodnoty rychlosti: 110 km/h, 145 km/h a 190 km/h. Pro tyto rychlosti byly z polynomů druhého stupně celkových závislostí zatížení na rychlosti odečteny zatížení pro jednotlivé rychlosti pro jednotlivé zkoušky. Tyto hodnoty zatížení byly přepočítány na stlačení tlumičů podle vztahů pro kola na pravé straně vozidla 32 a 34. V následující tabulce jsou zaznamenány hodnoty pro páté nastavení:

Tab. 4 Rozdíl v naklonění vozidla během dojezdové zkoušky a zkoušky za konstantní rychlosti - nast. 5

Rychlost [km/h]	XPk [mm]	XPd [mm]	XZk [mm]	XZd [mm]	rozdíl Pn [mm]	rozdíl Zn [mm]	Xc [mm]	β [°]
110	17,49	18,43	17,66	17,33	-0,94	0,33	1,27	0,029775
145	19,97	20,81	20,76	19,98	-0,84	0,77	1,61	0,037829
190	21,93	22,52	24,86	23,92	-0,59	0,94	1,53	0,035904

kde XPk a XZk označují velikost stlačení tlumiče na přední a zadní nápravě při zkoušce za konstantní rychlosti, XPd a XZd označují velikost stlačení tlumiče na přední a zadní nápravě při dojezdové zkoušce, Pn a Zn reprezentují přední a zadní nápravu. Xc reprezentuje celkový rozdíl stlačení vypočtený jako součet absolutních hodnot rozdílu stlačení pro jednotlivé nápravy, a β označuje rozdíl v naklonění vozidla mezi dojezdovou zkouškou a zkouškou za konstantní rychlosti a byl vypočten dle vztahu:

$$\beta = \tan^{-1}(Xc/l) \quad (40)$$

Hodnoty úhlu β pro ostatní nastavení vycházejí podobně malé jako pro páté nastavení, lze tedy konstatovat, že vliv load transferu je sice hmatatelný - mírně větší stlačení tlumičů a pružin na přední nápravě a naopak mírně větší roztažení tlumičů a pružin na zadní nápravě u dojezdové zkoušky, nicméně celkový rozdíl v naklonění vozidla vlivem load transferu vychází v řádu setin stupně, tudíž by neměl mít prakticky žádný vliv na aerodynamické vlastnosti vozidla.

6.4 VÝPOČTY KOEFICIENTU AERODYNAMICKÉHO ODPORU

Koeficient aerodynamického odporu je velmi dobrým parametrem pro určování aerodynamických vlastností vozidla. V našem případě by mohl být použitelný pro porovnávání jednotlivých nastavení vozidla mezi sebou.



Koeficienty aerodynamického odporu c_X pro jednotlivá nastavení byly vypočítány ze závislosti zrychlení na rychlosti z dojezdových zkoušek. Tyto závislosti byly proloženy polynomy druhého stupně ve tvaru:

$$a(v) = A * v^2 + B * v + C \quad (41)$$

Vynásobíme - li rychlost na levé straně rovnice hmotností vozidla dostaneme závislost celkové odporové síly F_{CX} na rychlosti:

$$F_{CX}(v) = A * v^2 + B * v + C \quad (42)$$

ve které koeficient A reprezentuje aerodynamický odpor, koeficient B reprezentuje odpory závislé na rychlosti a koeficient C reprezentuje odpory nezávislé na rychlosti. Vyjádříme - li z předchozího vztahu aerodynamickou odporovou sílu, dostaneme:

$$F_X(v) = A * v^2 \quad (43)$$

Aerodynamická odporová síla je též dána vztahem:

$$F_X = -\frac{1}{2} * c_X * \rho * v^2 * S \quad (44)$$

kde S reprezentuje čelní plochu vozidla.

Z rovnosti těchto vztahů dostaneme:

$$A * v^2 = -\frac{1}{2} * c_X * \rho * v^2 * S \quad (45)$$

Jednoduchým vyjádřením pak obdržíme hodnotu aerodynamického součinitele odporu:

$$c_X = \frac{2 * A}{\rho * S} \quad (46)$$

Vzhledem k tomu, že autor práce nemá k dispozici údaj o čelní ploše vozidla, byla při výpočtech uvažována čelní plocha o velikosti $S = 1,1 \text{ m}^2$, která byla určena odhadem. Protože autor práce též nemá k dispozici údaje o meteorologických podmínkách během měření, byla zvolena hustota vzduchu o velikosti $\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$, odpovídající hustotě suchého vzduchu při teplotě 15°C .

Z těchto důvodů vypočtené součinitele aerodynamického odporu pro jednotlivá nastavení mohou mít pouze informativní charakter a mohou posloužit pouze pro porovnávání jednotlivých nastavení vozu mezi sebou.

Součinitele vzdušného odporu byly vypočítány z kompletní závislosti celkové odporové síly na rychlosti a ze závislosti bez lineárního členu (viz příloha A):

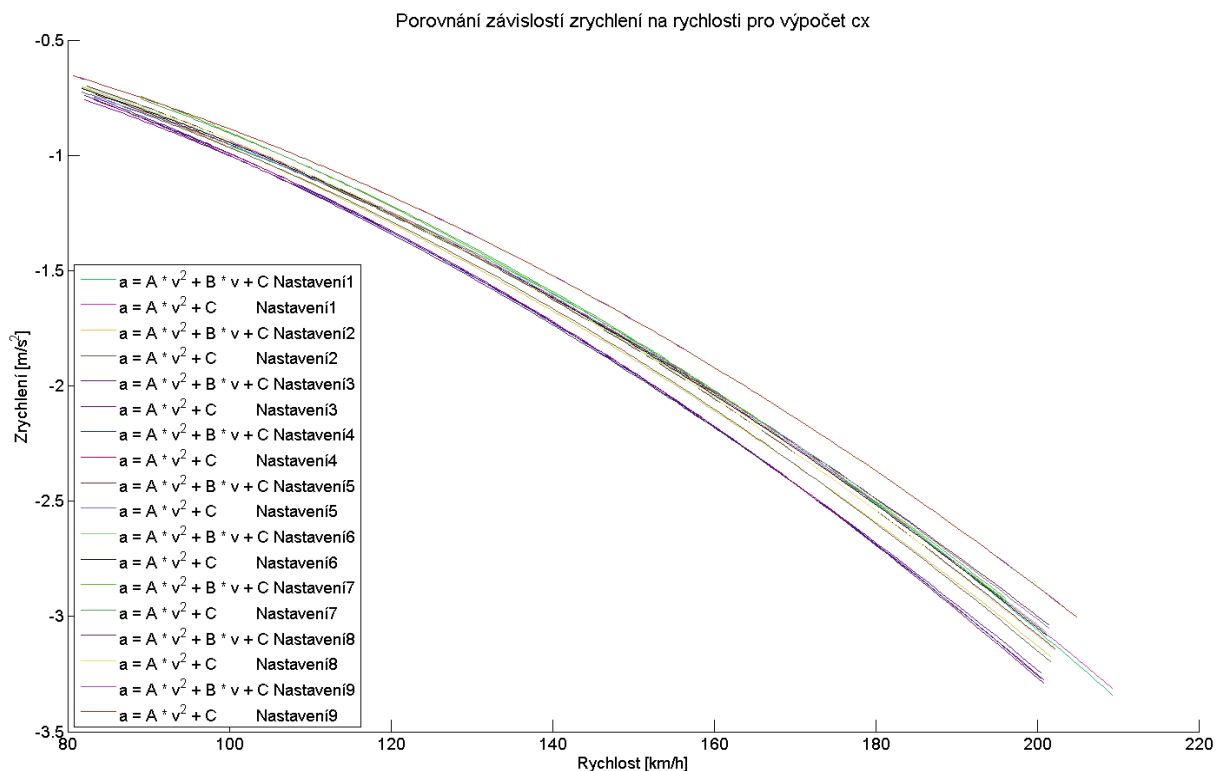
$$F_{CX}(v) = A * v^2 + B * v + C \quad (47)$$

$$F_{CX}(v) = A * v^2 + C \quad (48)$$



Výpočet koeficientu aerodynamického odporu ze závislosti bez lineárního členu byl prováděn za účelem zlepšení výsledků - celkový odpor je v tomto případě tvořen pouze odporem vzdušným a odpory vozidla nezávislými na rychlosti.

Na následujícím znázornění jsou zobrazeny polynomy závislosti zrychlení na rychlosti pro všechna nastavení, ze kterých vychází polynomy závislosti odporové síly na rychlosti, ze kterých je vypočítáván součinitel aerodynamického odporu.



Obr. 56 Porovnání závislosti zrychlení na rychlosti pro výpočet c_x pro všechna nastavení.

Na obrázku sice není možné přesně identifikovat a přiřadit jednotlivé křivky k popiskům, nicméně zřejmé a podstatné je to, že všechny křivky mají velmi podobný průběh a křivky pro jedno nastavení jsou téměř totožné, což bylo zjištěno i při podrobném prozkoumávání jednotlivých závislostí v programu Matlab.

Tab. 5 Srovnání koeficientů vzdušného odporu pro jednotlivá nastavení a způsoby výpočtu

Nastavení	$c_x [-]$ $a = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$	$c_x [-]$ $a = A \cdot v^2 + C$
1	0,863	0,729
2	0,667	0,756
3	0,685	0,780
4	0,725	0,788
5	0,658	0,713
6	0,678	0,729
7	0,666	0,743
8	0,718	0,745
9	0,676	0,680



Zamyslíme-li se nad prvními čtyřmi nastaveními, dojdeme k závěru, že věrohodnější koeficienty vzdušného odporu vycházejí z výpočtů z polynomu bez lineárního členu - v tabulce ve třetím sloupci. První nastavení je nejběžněji používané nastavení, druhé nastavení je nastavení pro maximální přítlak, třetí nastavení je nastavení pro maximální přítlak s dvojitým zadním křídlem a čtvrté nastavení má maximální nastavení předního spoileru pro jízdu na mokru a též dvojitě zadní křídlo. Pro tyto popisy nastavení lépe odpovídají koeficienty c_x ze třetího sloupce tabulky. Uvěřitelnosti koeficientů ve druhém sloupci tabulky zabráňuje příliš vysoká hodnota koeficientu pro první, tedy nejběžněji používané nastavení.

Při porovnávání koeficientu aerodynamického odporu z obou metod výpočtu pro nastavení pět až osm, kdy při pátém nastavení je stejná výška vozidla jako ve čtyřech předchozích, tedy běžně používaná, při šestém výrazně vyšší výška zadní nápravy, při sedmém jsou výšky přední i zadní nápravy totožné a při osmém jsou výrazněji zvednuté obě nápravy, vyplývá, že nelze jednoznačně určit, která z metod výpočtu poskytuje objektivnější informace. Obě metody se shodnou v tom, že se vzrůstající výškou vozidla stoupá vzdušný koeficient odporu, avšak rozdíl je v nastavení se stejnou výškou přední i zadní nápravy, kdy jednou vychází koeficient větší než při šestém nastavení a podruhé menší než při šestém nastavení.

Deváté nastavení je shodné s pátým nastavením vozu, s tím rozdílem, že při devátém nastavení byl z vozidla odmontován difuzor. Teoretickému předpokladu, že nastavení bez difuzoru bude mít nižší koeficient vzdušného odporu, odpovídá metoda výpočtu z polynomu bez lineárního členu (třetí sloupec tabulky), naopak metoda výpočtu z kompletního polynomu tento předpoklad popírá.

V tuto chvíli tedy není možné zcela jednoznačně posoudit objektivnost jednotlivých metod výpočtu koeficientu aerodynamického odporu, nicméně metoda výpočtu koeficientu z polynomu bez lineárního členu se jeví jako vhodnější, což potvrzuje i třetí kapitola této práce, kde všechny na vozidlo působící odpory kromě aerodynamického mají charakter konstanty a nejsou závislé na rychlosti. Pro další porovnávání koeficientů odporu jednotlivých nastavení dále v této práci tedy bude použita tato metoda.

6.5 VÝPOČTY KOEFICIENTU AERODYNAMICKÉHO VZTLAKU

Stejně jako koeficient vzdušného odporu, tak i koeficienty aerodynamického vztlaku pro jednotlivé nápravy jsou dobrými ukazateli aerodynamických vlastností vozidla. V našem případě by mohly posloužit ke vzájemnému porovnávání jednotlivých nastavení vozu.

6.5.1 VÝPOČET SOUČINITELŮ VZTLAKU Z KOEFICIENTŮ POLYNOMŮ

Součinitele aerodynamického vztlaku c_L pro jedno nastavení byly vypočítány ze závislosti zatížení kol přední a zadní nápravy na rychlosti, která byla získána zprůměrováním výsledných polynomů druhého stupně závislosti zatížení kol na rychlosti z dojezdové zkoušky a ze zkoušky za konstantní rychlosti. Tato závislost byla opět proložena dvěma polynomy těchto tvarů:

$$F_{CL}(v) = A * v^2 + B * v + C \quad (49)$$



$$F_{CL}(v) = A * v^2 + C \quad (50)$$

kde F_{CL} představuje celkovou vertikální sílu působící na kolo, A reprezentuje změnu zatížení v důsledku obtékání vzduchu, B změny zatížení závislé na rychlosti a C statické zatížení kola.

Vyjádříme-li z těchto rovnic vztakovou sílu, dostaneme:

$$F_L(v) = A * v^2 \quad (51)$$

Vztaková síla je též dána vztahem:

$$F_L = -\frac{1}{2} * c_L * \rho * v^2 * S \quad (52)$$

kde c_L představuje vztakový koeficient.

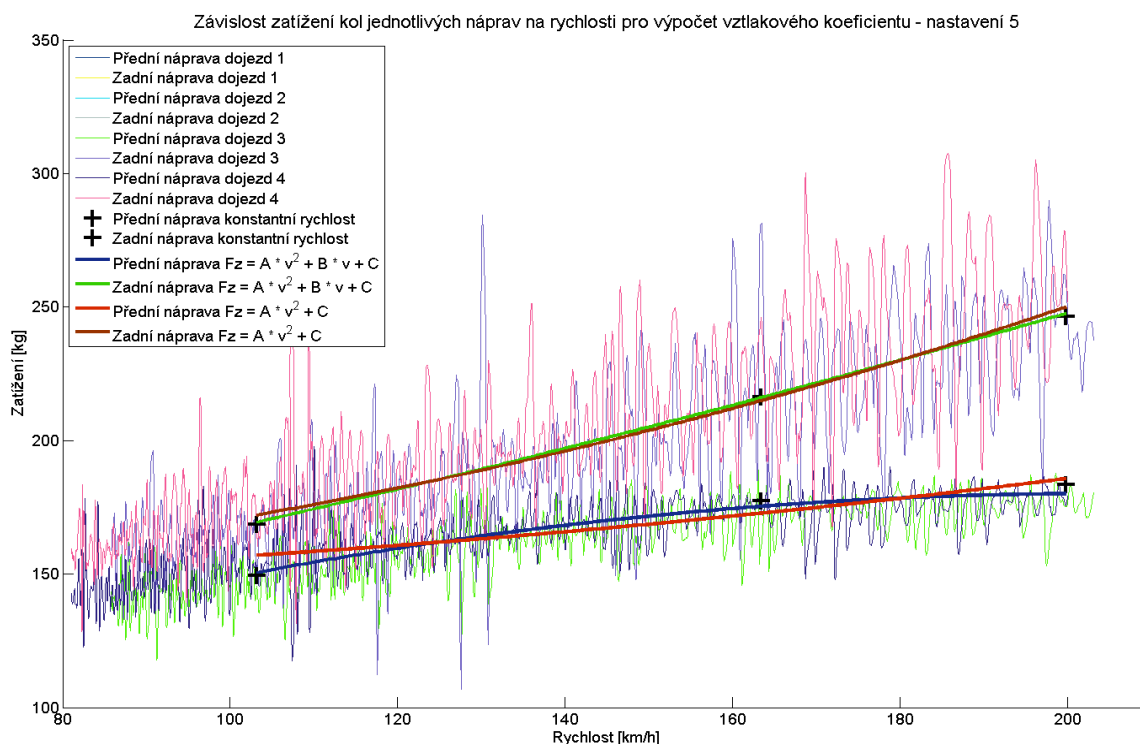
Z rovnosti těchto vztahů dostaneme:

$$A * v^2 = -\frac{1}{2} * c_L * \rho * v^2 * S \quad (53)$$

Jednoduchou úpravou pak získáme vztah pro výpočet aerodynamického součinitele vztlaku:

$$c_L = \frac{2 * A}{\rho * S} \quad (54)$$

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny jednotlivé polynomy pro výpočet koeficientu aerodynamického vztlaku i s daty, ze kterých vycházejí, a to jak pro přední, tak pro zadní nápravu při pátém nastavení.



Obr. 57 Závislosti zatížení kol na rychlosti pro výpočet c_L včetně dat, ze kterých vycházejí



Vzhledem k tomu, že jednotlivé křivky jsou prokládány daty jak z dojezdových zkoušek, tak ze zkoušek za konstantní rychlosti, a vychází tedy ze zpracování velkého množství dat, není možné jednoduše určit, která křivka přesněji vystihuje prokládaná data. Je však patrné, že křivky polynomů jednotlivých metod výpočtu koeficientu vztlaku jsou poměrně rozdílné, tudíž nelze očekávat velkou shodu výsledků jednotlivých metod.

Průběhy křivek jednotlivých metod výpočtu koeficientu vztlaku pro jednotlivá nastavení jsou podobné průběhům pro páté nastavení zobrazené výše, nebudou zde tedy zobrazovány. Koeficienty křivek pro přední i zadní nápravu pro všechna nastavení jsou uvedeny v druhé a třetí tabulce přílohy A.

Vypočtené součinitele aerodynamického vztlaku pro obě metody výpočtu pro přední i zadní nápravu byly ukládány do tabulky.

Tab. 6 Srovnání aerodynamických koeficientů vztlaku pro obě metody zpracování

Číslo nastavení	c_L [-] Přední náprava		c_L [-] Zadní náprava	
	$F_L = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$	$F_L = A \cdot v^2 + C$	$F_L = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$	$F_L = A \cdot v^2 + C$
1	-0,619	0,166	0,172	0,506
2	-0,509	0,187	0,372	0,514
3	-0,544	0,201	0,399	0,579
4	-0,618	0,206	0,314	0,579
5	-0,558	0,188	0,186	0,511
6	-0,624	0,188	0,147	0,557
7	-0,372	0,208	0,145	0,512
8	-0,469	0,201	0,285	0,594
9	-0,524	0,201	0,125	0,444

Z tabulky je patrné, že koeficienty pro jednotlivé metody zpracování vychází velmi rozdílné. Dokonce se liší i ve znaménku, což je dáno tím, že křivky, ze kterých vychází kladné koeficienty, jsou konvexní, zatímco křivky pro přední nápravu z kompletního polynomu jsou konkávní, jak je patrní z obrázku 58.

Díky velkému rozptylu hodnot i díky tomu, že nikterak neodpovídají teoretickým předpokladům, lze usoudit, že obě metody v podstatě selhaly, a na rozdíl od výpočtu součinitele aerodynamického odporu nepřinášejí ani náznakem jakkoli použitelné výsledky.

6.5.2 VÝPOČTU SOUČINITELŮ VZTLAKU PŘÍMO ZE VZTAHU

Další metodou určení koeficientů aerodynamického vztlaku na jednotlivých nápravách byla metoda založená na výpočtu pouze ze vztahu:

$$F_L = -\frac{1}{2} * c_L * \rho * v^2 * S \quad (55)$$

jehož jednoduchou úpravou vyjádříme samotné c_L :



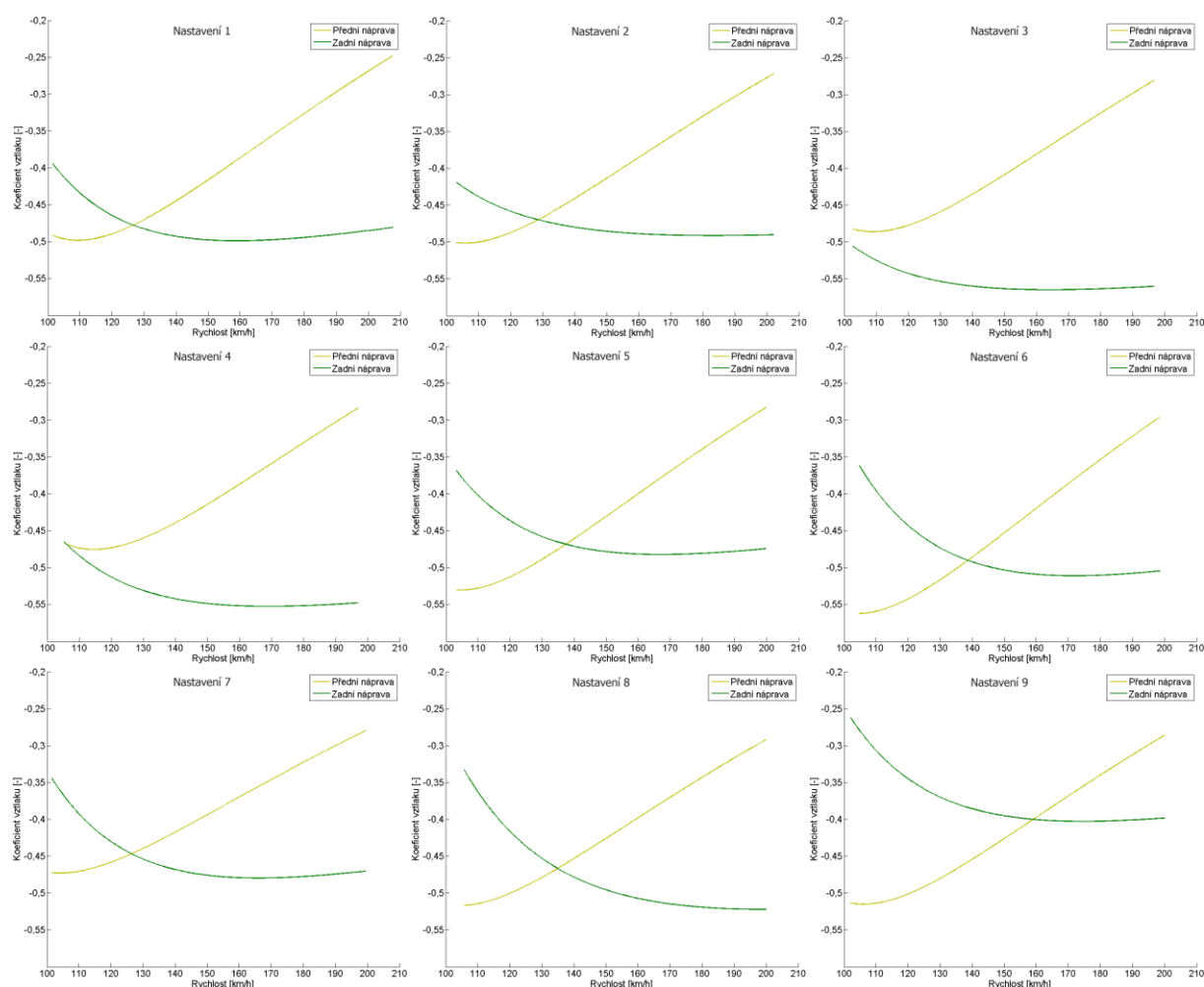
$$c_L = \frac{2 * F_L}{\rho * v^2 * S} \quad (56)$$

kde za v byl vložen vektor rychlostí pro které je koeficient c_L vypočítáván a F_Z bylo určeno jako rozdíl celkového zatížení kola na nápravě a statického zatížení kola na nápravě, dle vztahu:

$$F_L = F_{CL} - F_{Zstat} \quad (57)$$

kde F_{Zstat} představuje statické zatížení kola příslušné nápravy a za F_{CL} byl vložen vektor zatížení kola dané nápravy vycházející z celkového polynomu druhého stupně závislosti zatížení kola dané nápravy na rychlosti.

Takto vznikl vektor koeficientů vztlaku pro jednotlivé rychlosti. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny závislosti vypočtených hodnot koeficientu vztlaků na rychlosti pro všechna nastavení vozu.



Obr. 58 Závislost vypočtených koeficientů vztlaku na rychlosti pro všechna nastavení vozu

Z obrázku je patrné, že hodnota vypočtených koeficientů vztlaku pro přední i zadní nápravu se s rychlostí mění, což odporuje teoretickým předpokladům. Tato nekonstantnost bude pravděpodobně zapříčiněna nepřesně spočítaným load transferem (nepřesnost vznikla tím, že



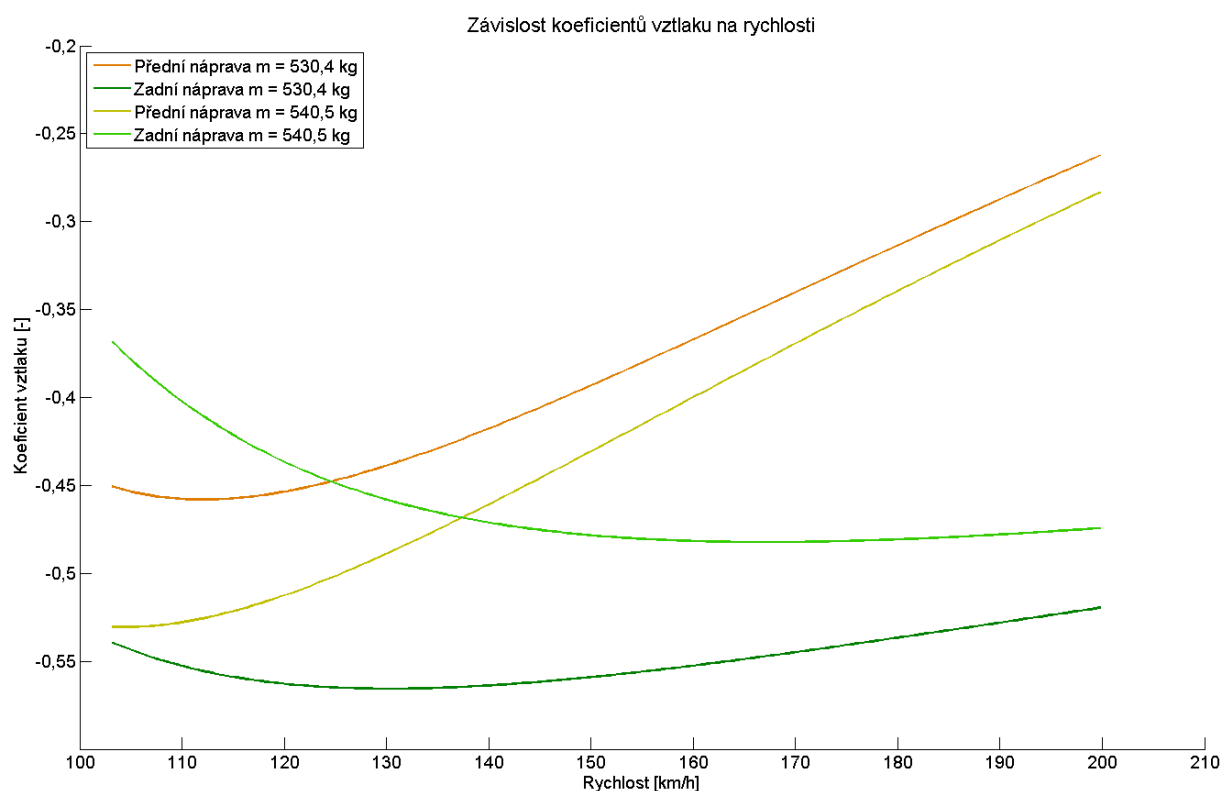
autor nemá k dispozici hodnotu výšky těžiště vozidla, proto byla ve výpočtech uvažována hodnota obvyklá pro tuto kategorii vozidel, která se však od skutečné hodnoty s vysokou mírou pravděpodobnosti více či méně odlišuje), či nepřesně určeným statickým zatížením jednotlivých kol, což je možné si demonstrovat na následujícím porovnání:

Při pokusu vylepšit průběh jednotlivých závislostí koeficientu vztlaku na rychlosti bylo vycházeno z dat z tabulky 3 v kapitole 6.2.2, kde byly zprůměrovány hodnoty zatížení pro jednotlivá kola a následně byly vypočteny průměry z těchto hodnot pro každou nápravu. Získané hodnoty byly vloženy do tabulky ve které byly srovnány s hodnotami dodanými týmem Chabr Motorsport:

Tab. 7 Srovnání hodnot hmotnosti a statického zatížení kol jednotlivých náprav

Poznámka	Kolo přední nápravy [kg]	Kolo zadní nápravy [kg]	Celková m [kg]
Hodnoty ze stlačení tlumičů během jízdních testů	125,7	139,5	530,4
Hodnoty z vážení Chabr Motorsport	121,25	149	540,5

Tyto hodnoty byly zadány do výpočtu koeficientu vztlaku při pátém nastavení a znázorněny na následujícím obrázku, ze kterého je jasné vidět, že při uvažování statické hmotnosti získané ze stlačení tlumičů vychází průběhy závislosti koeficientu vztlaku na rychlosti příznivější než při uvažování dat dodaných.



Obr. 59 Porovnání závislosti koeficientů vztlaku na rychlosti pro hmotnost vozidla získanou z různých zdrojů pro nastavení 5



Vrátíme-li se k průběhům znázorněným na obrázku 59, zjistíme, že průběhy pro přední i zadní nápravu různých nastavení mají poměrně podobný trend. Aby byl z těchto průběhů získán číselný výstup, byla vypočtena průměrná hodnota koeficientu na obou nápravách pro jednotlivá nastavení a vložena do tabulky:

Tab. 8 Vypočtené vztlakové koeficienty pro jednotlivá nastavení

Nastavení	c_{Lf} [-]	c_{Lr} [-]
1	-0,395	-0,481
2	-0,402	-0,477
3	-0,402	-0,554
4	-0,401	-0,536
5	-0,422	-0,462
6	-0,443	-0,483
7	-0,389	-0,455
8	-0,415	-0,477
9	-0,417	-0,376

kde c_{Lf} reprezentuje vztlakový koeficient přední nápravy a c_{Lr} vztlakový koeficient zadní nápravy.

Na rozdíl od předchozích metod vyšly všechny koeficienty záporné, což značí, že vozidlo generuje zápornou vztlakovou sílu, tedy přítlak.

Zamyslíme-li se nad hodnotami koeficientů vztlaku přední a zadní nápravy v kontextu jednotlivých nastavení, zjistíme, že vesměs odpovídají teoretickým předpokladům. Předpokladům neodpovídá pouze první nastavení, kdy je přední spoiler nastaven stejně jako při druhém a třetím nastavení, avšak hodnoty vztlakového koeficientu se neshodují. Předpokladům též odporuje koeficient vztlaku na zadní nápravě prvního nastavení, neboť značí vyšší přítlak prvního (běžného) nastavení oproti druhému (na maximální přítlak nastaveného) nastavení. Další hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům ve smyslu, že vztlakový koeficient jednoho nastavení má větší/menší hodnotu než koeficient jiného nastavení, tudíž celková vypovídací hodnota není velká.

Z prováděných metod určení koeficientů vztlaku však tato poslední metoda poskytuje nejvěrohodnější výsledky a bude dále použita v této práci.

6.6 ZÁVISLOST VZTLAKOVÉ SÍLY NA VZDUŠNÉ ODPOROVÉ SÍLE

Vzhledem k tomu, že z výpočtů součinitele aerodynamického odporu ani z výpočtů vztlakových koeficientů nebyly získány výsledky odpovídající teoretickým předpokladům, bylo třeba charakterizovat vlastnosti jednotlivých nastavení vozidla z hlediska aerodynamického odporu a vztlaku jiným způsobem. Byly tedy vypočteny závislosti zatížení kol jednotlivých náprav na odporové síle.

Výpočet probíhal pro rychlosti 110 km/h, 120 km/h, 130 km/h, 140 km/h, 150 km/h, 160km/h, 170 km/h, 180 km/h a 190 km/h. Pro tyto rychlosti byly ze závislosti celkové

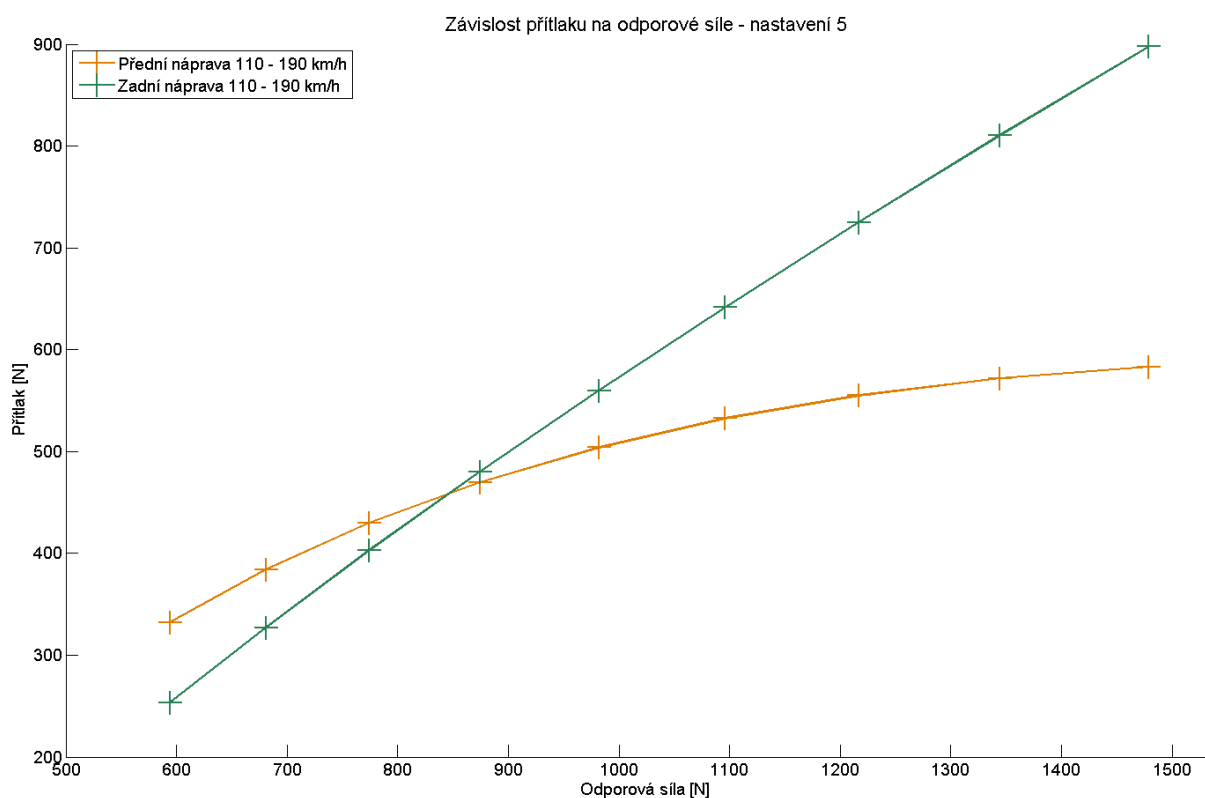


odporové síly na rychlosti odečteny hodnoty velikosti odporu pro dané rychlosti. Rozsah rychlostí byl volen tak, aby nebyl větší než rozsah rychlostí při zkouškách za konstantní rychlosti a počet rychlostí byl volen tak, aby byla zachována přehlednost grafického znázornění závislosti přtlaku na odporové síle.

Stejným způsobem byly pro dané rychlosti ze závislosti zatížení kol jednotlivých náprav na rychlosti získány hodnoty zatížení kol na přední a zadní nápravě. Od hodnot zatížení bylo následně odečteno statické zatížení a takto zpracované hodnoty byly spárovány (vždy hodnoty odpovídající stejné rychlosti) s hodnotami celkové odporové síly.

Tímto byla získána závislost vztlakové síly na odporové síle pro jednotlivá nastavení. Tabulky hodnot přtlaku a odporové síly pro všechna zkoumaná nastavení jsou uvedeny v příloze B.

Ve znázornění jsou zobrazeny křivky pro přední a zadní nápravu. Na těchto křivkách jsou značky ve tvaru kříže nebo hvězdy, které představují body závislosti přtlaku na odporové síle pro jednotlivé rychlosti - nejvíce vlevo jsou body pro 110 km/h, zcela vpravo pak body pro 190 km/h.



Obr. 60 Závislost záporné vztlakové síly (přtlaku) na odporové pro nastavení 5

Z obrázku je patrné, že přtlak na zadní nápravě vzrůstá značně strměji než přtlak na přední nápravě, avšak při rychlosti 110 km/h je zhruba o 100 N nižší než přtlak na přední nápravě, který ale roste méně strmě, což není zcela v souladu s teoretickými předpoklady, a tento jev by mohl být způsoben nepřesným určením statického zatížení vozidla během zkoušek (může tedy potvrzovat teorii, že při jízdních testech bylo jiné rozložení hmotnosti na nápravách než jaké bylo získáno vážením. Tato teorie byla dříve popsána v kapitole 6.5).



7 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou vyhodnoceny výsledky získané metodami popsány v předchozí kapitole.

7.1 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH NASTAVENÍ VOZU

V této kapitole budou porovnána jednotlivá nastavení vozu, nejprve nastavení se stejnou výškou vozidla, ale rozdílným nastavením aerodynamických prvků, posléze budou porovnána nastavení se stejným nastavením aerodynamických prvků, ale rozdílnou výškou a nakonec budou porovnána stejná nastavení s difuzorem a bez něj.

7.1.1 VLIV NASTAVENÍ AERODYNAMICKÝCH PRVKŮ

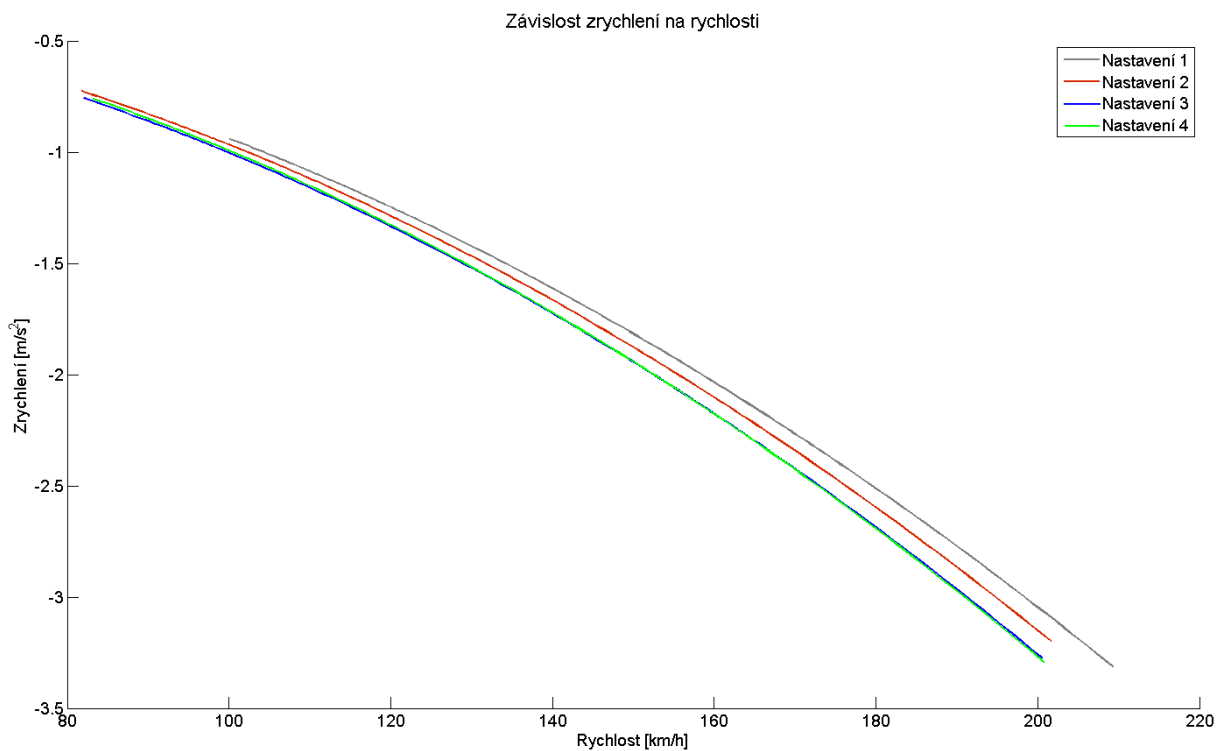
Přehled nastavení, pro která má vozidlo stejnou výšku, ale rozdílné nastavení předního a zadního spoileru s popisem nastavení je uveden v následující tabulce.

Tab. 9 Přehled nastavení vozu pro stejnou výšku a rozdílné nastavení aerodynamických prvků

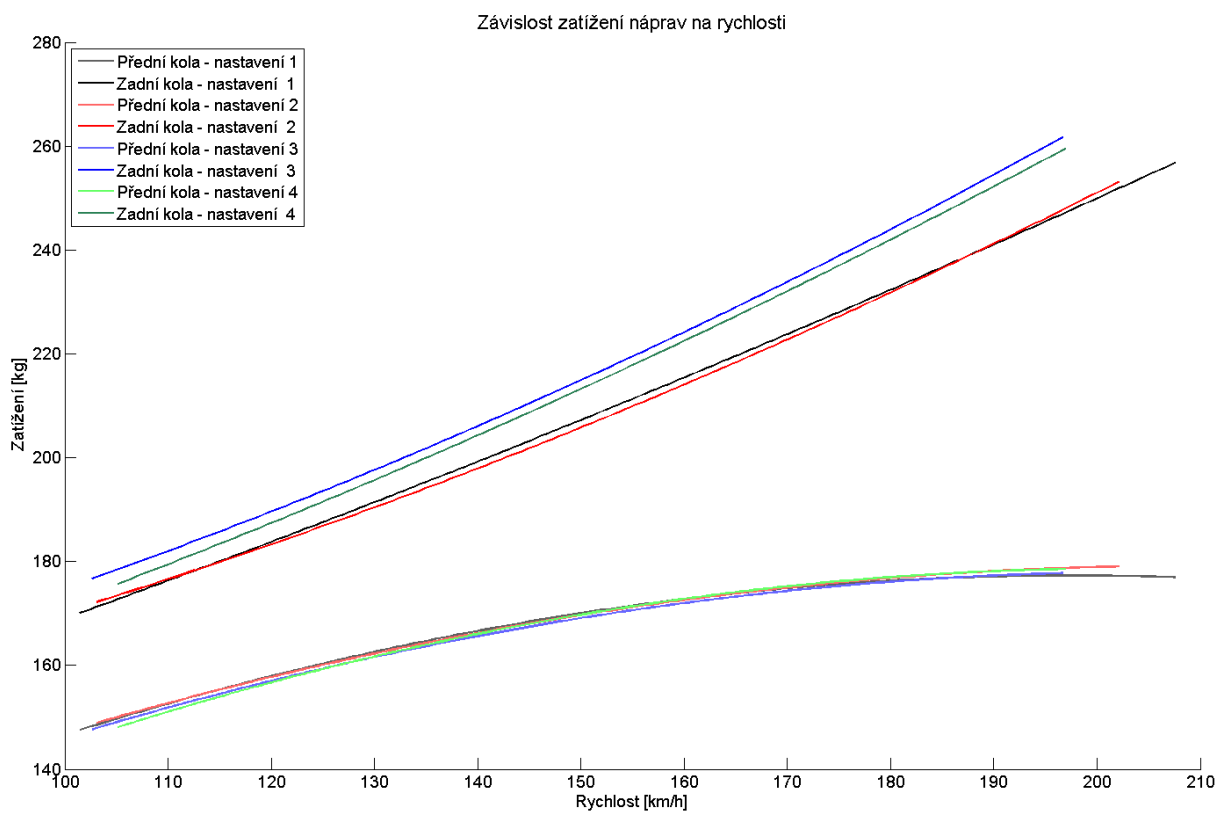
Číslo nastavení	Výška Pn [mm]	Výška Zn [mm]	Přední spoiler [°]	Zadní spoiler	Popis nastavení
1	27	38	23	5C/1A	Nejběžnější okružové nastavení
2	27	38	23	9A/3A	Maximální přítlak
3	27	38	23	9A/3A	Maximální přítlak - dvojité zadní křídlo
4	27	38	30,5	9A/3A	Max. přední křídlo + dvojité zadní křídlo

Z grafu na další straně, který zobrazuje porovnání závislosti zrychlení na rychlosti pro jednotlivá nastavení, je zřejmé, že vozidlo s nastavením tři a čtyři má prakticky totožný průběh zpomalení, tudíž i velmi podobný aerodynamický odpor. Při druhém nastavení vozidlo zpomaluje mírněji, bude tedy mít menší odpor. Nejmírněji zpomaluje vozidlo při prvním nastavení, je tedy předpoklad, že bude generovat nejnižší aerodynamický odpor.

Z grafu závislosti zatížení kol jednotlivých náprav na rychlosti pro jednotlivá nastavení je zřejmé, že průběh zatížení kola přední nápravy na rychlosti je pro všechna porovnávaná nastavení velmi podobný, téměř identický. Zvětšení úhlu předního spoileru při čtvrtém nastavení tedy nemá prakticky žádný vliv na přítlak. Je též zřejmé, že na zadní nápravě je největší zatížení při třetím nastavení, při čtvrtém nastavení je zatížení kola zadní nápravy jen mírně menší; a pro druhé a první nastavení je zatížení na zadní nápravě téměř identické a je nižší než při třetím a čtvrtém nastavení.



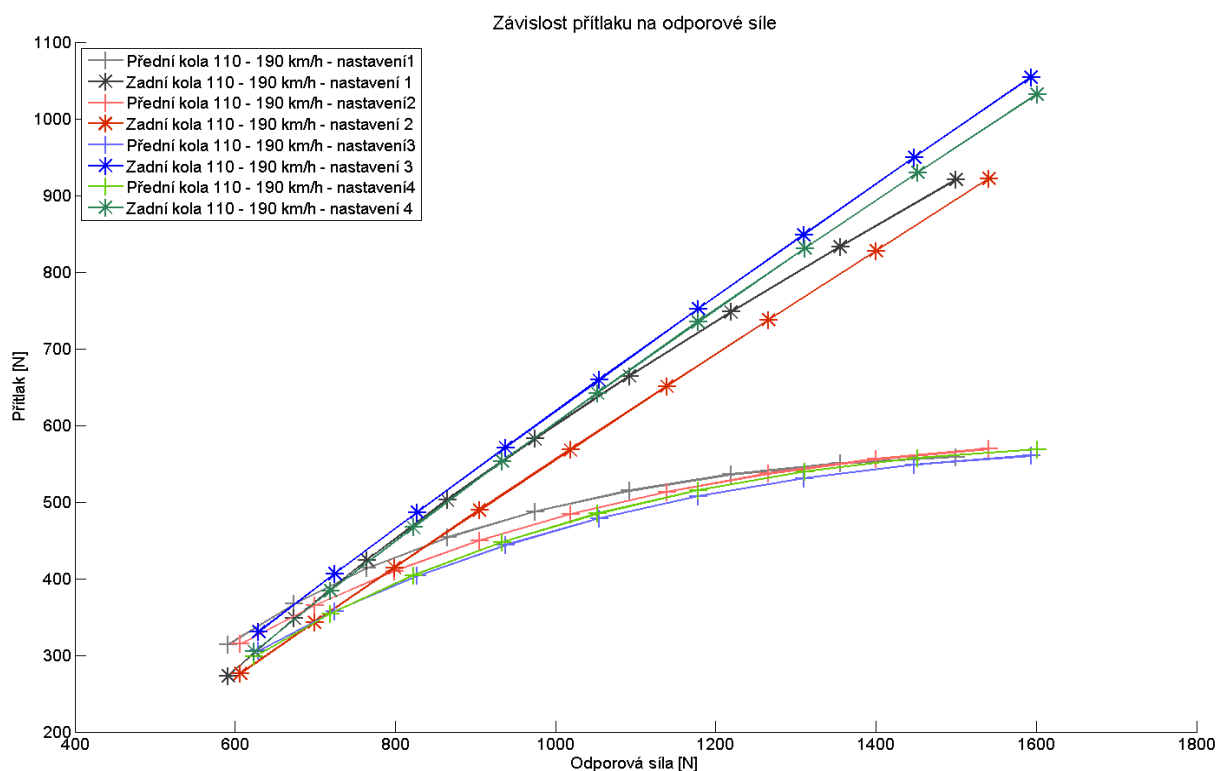
Obr. 61 Srovnání závislostí zrychlení na rychlosti z dojezdových zkoušek pro nastavení 1 - 4



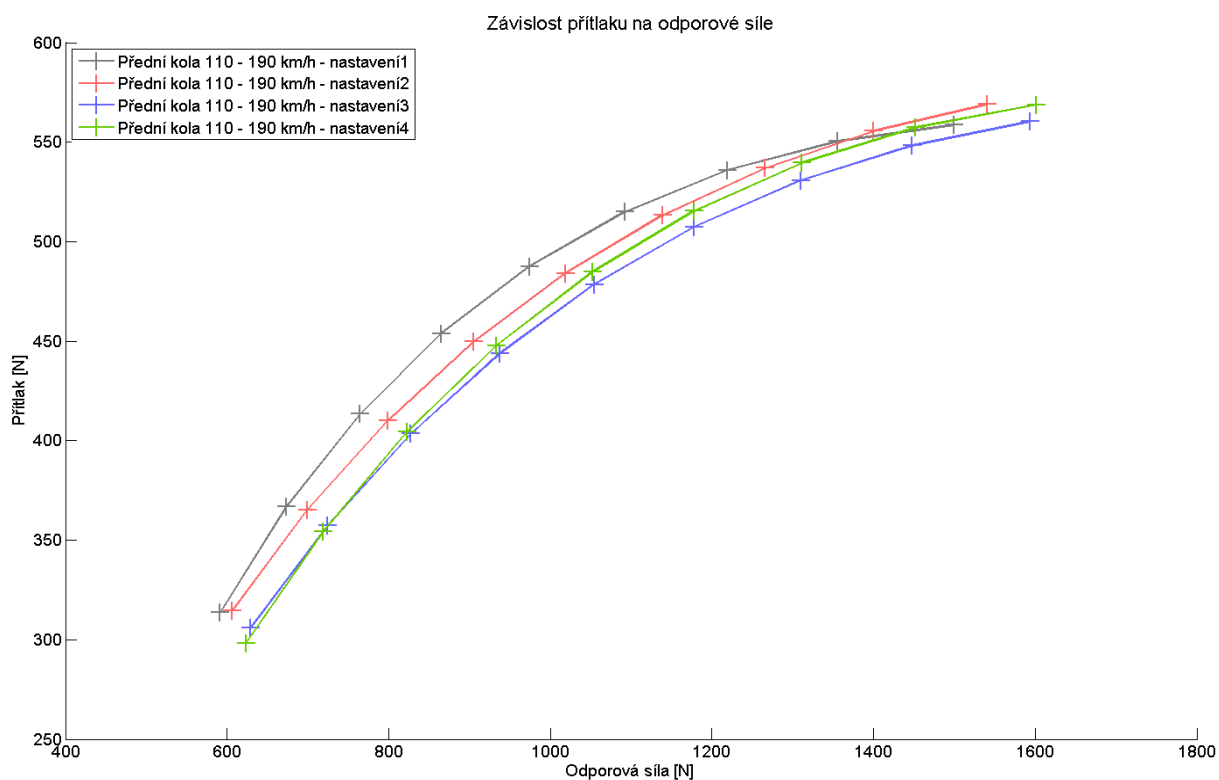
Obr. 62 Srovnání závislostí zatížení na rychlosti pro nastavení 1 - 4



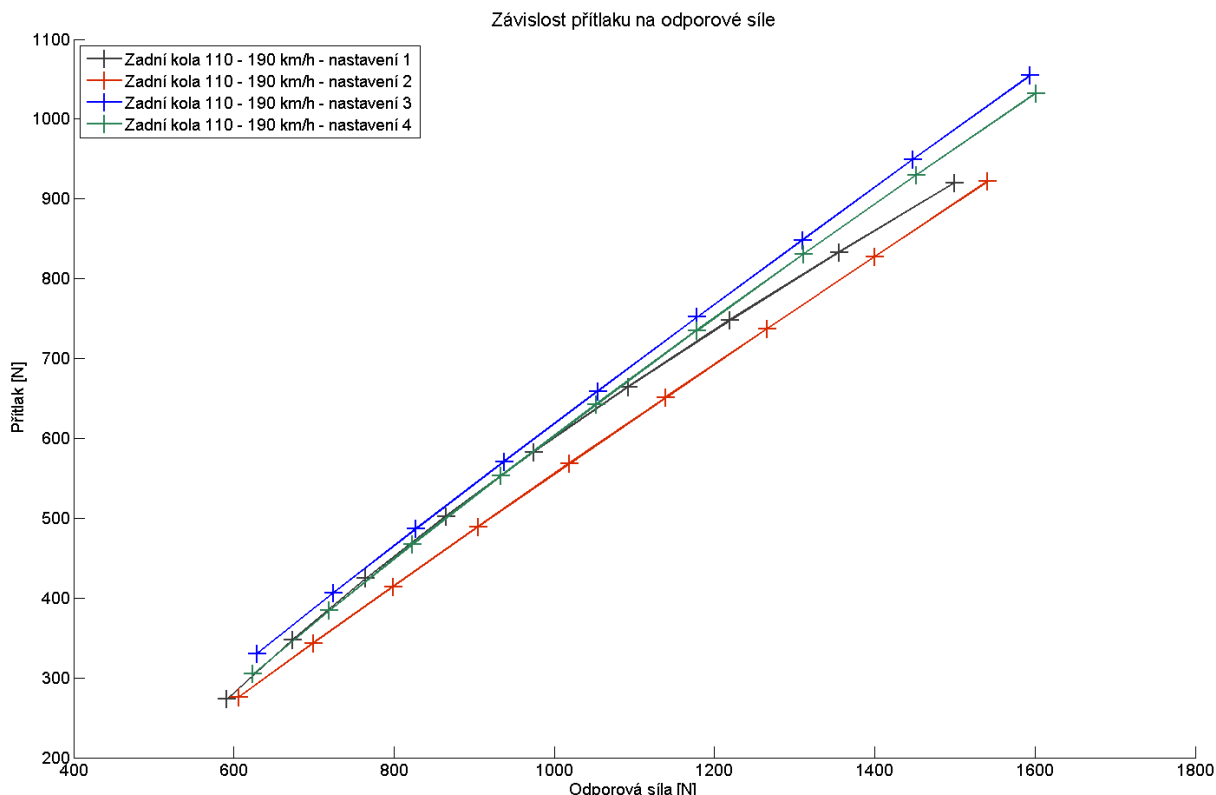
Na následujících grafech jsou zobrazeny závislosti přtlaku na odporové síle pro daná nastavení pro obě nápravy, pro přední a pro zadní nápravu.



Obr. 63 Závislost přtlaku na odporové síle pro nastavení 1 - 4



Obr. 64 Závislost přtlaku na odporové síle na přední nápravě pro nastavení 1 - 4



Obr. 65 Závislost přítlaku na odporové síle na zadní nápravě pro nastavení 1 - 4

Z grafů závislosti přítlaku na odporové síle pro přední nápravu vyplývá, že větší úhel předního křídla nemá téměř žádný vliv na velikost přítlaku. Je též možné si všimnout poměrně odlišného průběhu prvního nastavení od průběhu druhého a třetího nastavení. Tato nastavení by podle teoretických předpokladů (všechny tři mají shodně nastavené přední křídlo) měla mít identický průběh a měla by vůči sobě být posunuta v ose odporové síly z důvodu rozdílných nastavení zadního křídla.

Z grafu závislosti přítlaku na odporové síle pro kolo zadní nápravy je patrné, že největšího přítlaku, ale také odporu, bylo dosaženo pro třetí nastavení. Nastavení zadního křídla je pro třetí a čtvrté nastavení identické, rozdíl mezi nimi tedy může být způsoben rozdílným nastavením předního spoileru, nebo nepřesnostmi při měření (povětrnostní vlivy, apod.). Jako nejméně výhodné se jeví druhé nastavení - oproti prvnímu nastavení poskytuje horší přítlak i odporovou sílu.

Následují tabulky vypočtené odporové síly a přítlaku na přední a zadní nápravě pro první až čtvrté nastavení.

Tab. 10 Velikost odporové síly [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	592	674	765	865	974	1092	1219	1355	1500
2	607	699	799	905	1018	1139	1266	1400	1541
3	629	725	828	937	1054	1179	1310	1448	1594
4	624	719	823	933	1052	1178	1311	1452	1601



Tab. 11 Velikost přtlaku na kole přední nápravy [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	314	367	413	454	488	515	536	550	559
2	315	365	410	450	484	513	537	556	569
3	306	357	403	444	478	507	531	548	560
4	298	354	404	448	485	515	540	557	569

Tab. 12 Velikost přtlaku na kole zadní nápravy [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	273	348	424	502	582	664	748	833	920
2	276	343	414	489	568	651	737	828	922
3	330	406	486	571	659	752	848	949	1054
4	305	384	467	553	642	735	831	930	1032

Zjištěné výsledky poměrně dobře korespondují s koeficienty odporu vypočtenými z polynomu bez lineárního členu, a vztlaků vypočtených metodou přímo ze vztahu.

V následující tabulce jsou zobrazeny koeficienty odporu a vztlaků pro zkoumaná nastavení.

Tab. 13 Porovnání koeficientů aerodynamického odporu a vztlaků pro jednotlivá nastavení

Nastavení	$c_x [-]$	$a = A \cdot v^2 + C$	$c_{Lf} [-]$	$c_{Lr} [-]$
1	0,729	-0,395	-0,481	-0,481
2	0,756	-0,402	-0,477	-0,477
3	0,780	-0,402	-0,554	-0,554
4	0,788	-0,401	-0,536	-0,536

Ze získaných průběhů a koeficientů je velmi obtížné vyhodnotit dopad změn nastavení vozidla na jeho aerodynamické vlastnosti. Je zřejmé, že data, ze kterých je vycházeno, jsou zatížena poměrně velkou chybou, která je patrně dána povětrnostními vlivy a nedokonalostmi dráhy.

Výsledky z tohoto porovnání jsou tedy v podstatě dva - zvětšení úhlu předního spoileru má téměř zanedbatelný vliv na přtlak na přední nápravě a dvojité zadní křídlo generuje vyšší přtlak na zadní nápravě, ale zvyšuje též aerodynamický odpor.



7.1.2 VLIV VÝŠKY VOZIDLA

Přehled nastavení, pro která má vozidlo stejné nastavení aerodynamických prvků, ale rozdílnou výšku na jednotlivých nápravách, je uveden v následující tabulce.

Tab. 14 Přehled nastavení vozu pro stejné nastavení aerodynamických prvků a různé výšky vozidla

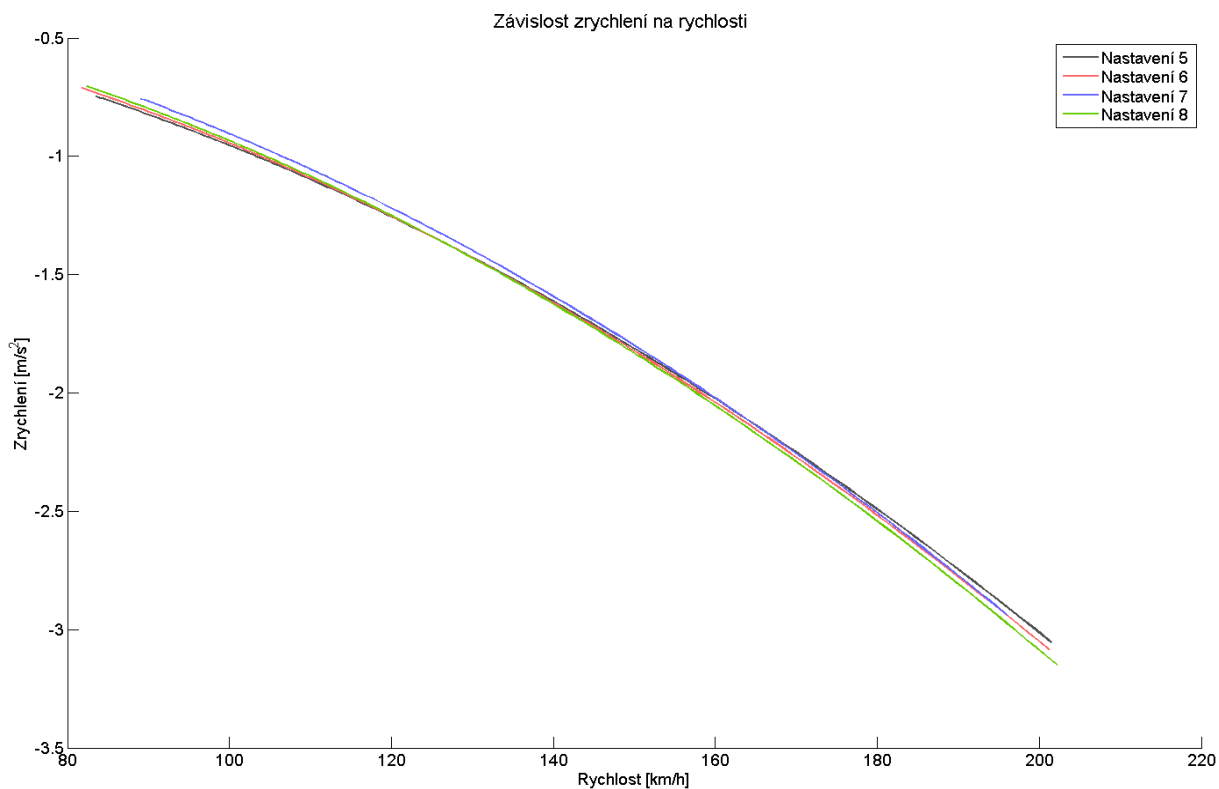
Číslo nastavení	Výška Pn [mm]	Výška Zn [mm]	Přední spoiler [°]	Zadní spoiler	Popis nastavení
5	27	38	27	6B/2A	Běžné nastavení
6	30	52	27	6B/2A	Vyšší zadní náprava
7	39	39	27	6B/2A	Obě nápravy stejně
8	39	59	27	6B/2A	Obě nápravy vyšší

Z grafu závislosti zrychlení na rychlosti na následující straně je zřejmé, že křivky jednotlivých nastavení jsou si velmi podobné, tudíž odporové síly a koeficienty vzdušného odporu budou pro jednotlivá nastavení podobné.

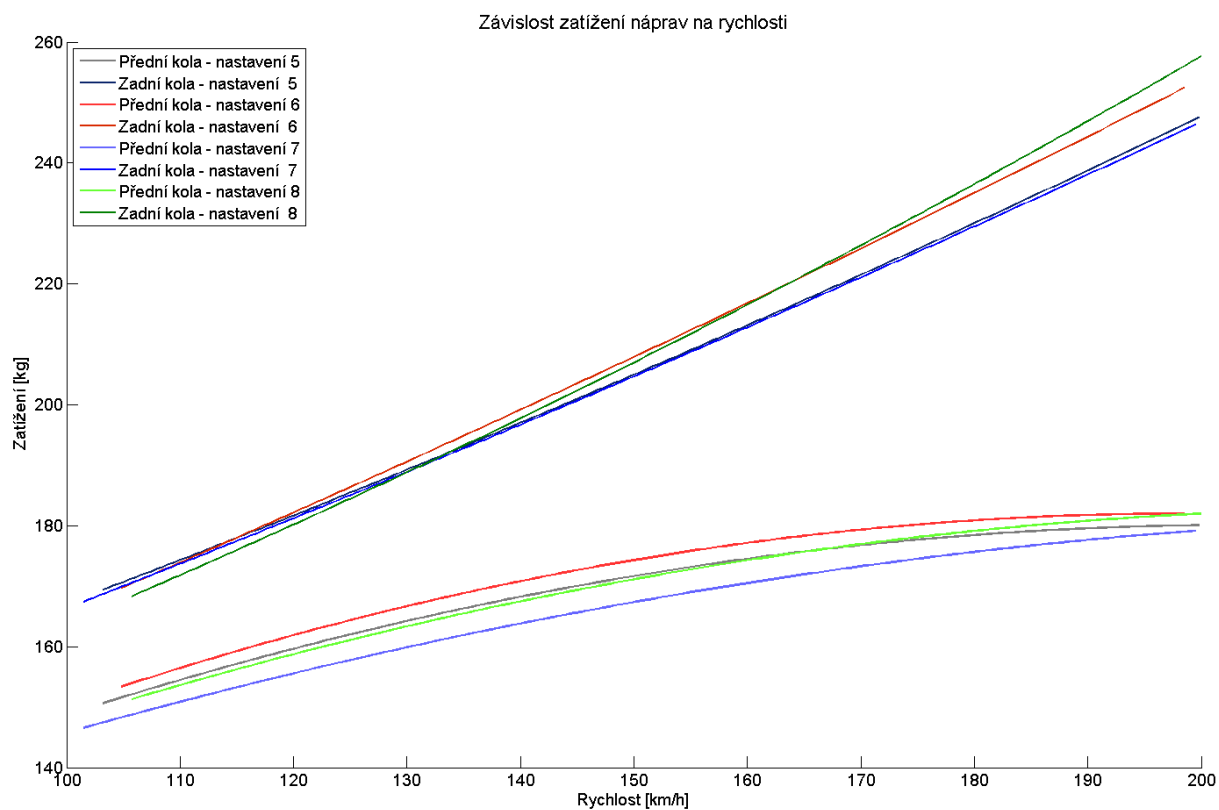
Z grafu závislosti zatížení jednotlivých náprav na rychlosti je zřejmé, že na přední nápravě je nejnižší zatížení pro sedmé nastavení, zatímco pro šesté nastavení je zatížení nejvyšší. Páté a osmé nastavení mají podobný průběh.

Na zadní nápravě je nejnižší zatížení pro sedmé nastavení, kterému se však velmi přibližuje páté nastavení. Vyšší zatížení poskytují šesté a osmé nastavení, jejichž křivky se kříží, což je patrně dáno chybou vzniklou neuvažováním vlivu povětrnostních podmínek.

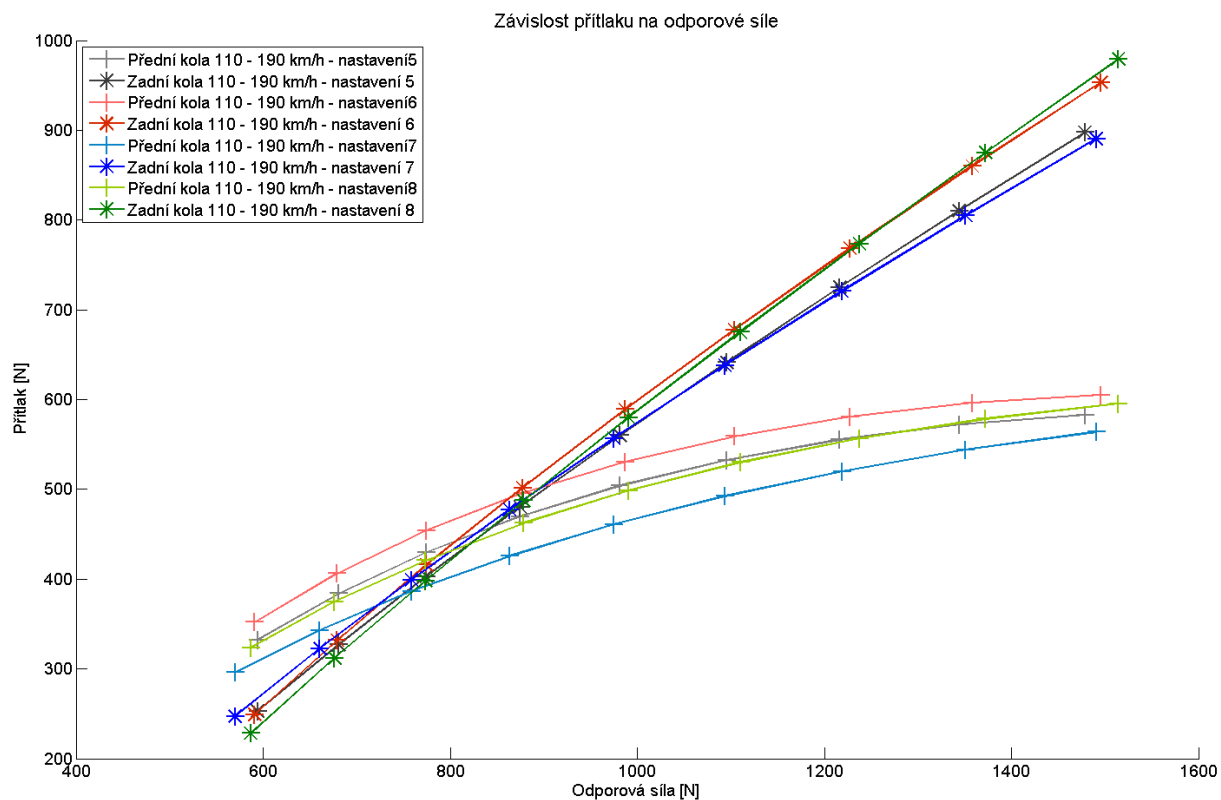
Následují grafy závislostí zrychlení na rychlosti a zatížení kol na nápravách na rychlosti a grafy závislosti přítlaku na aerodynamické odporové síle.



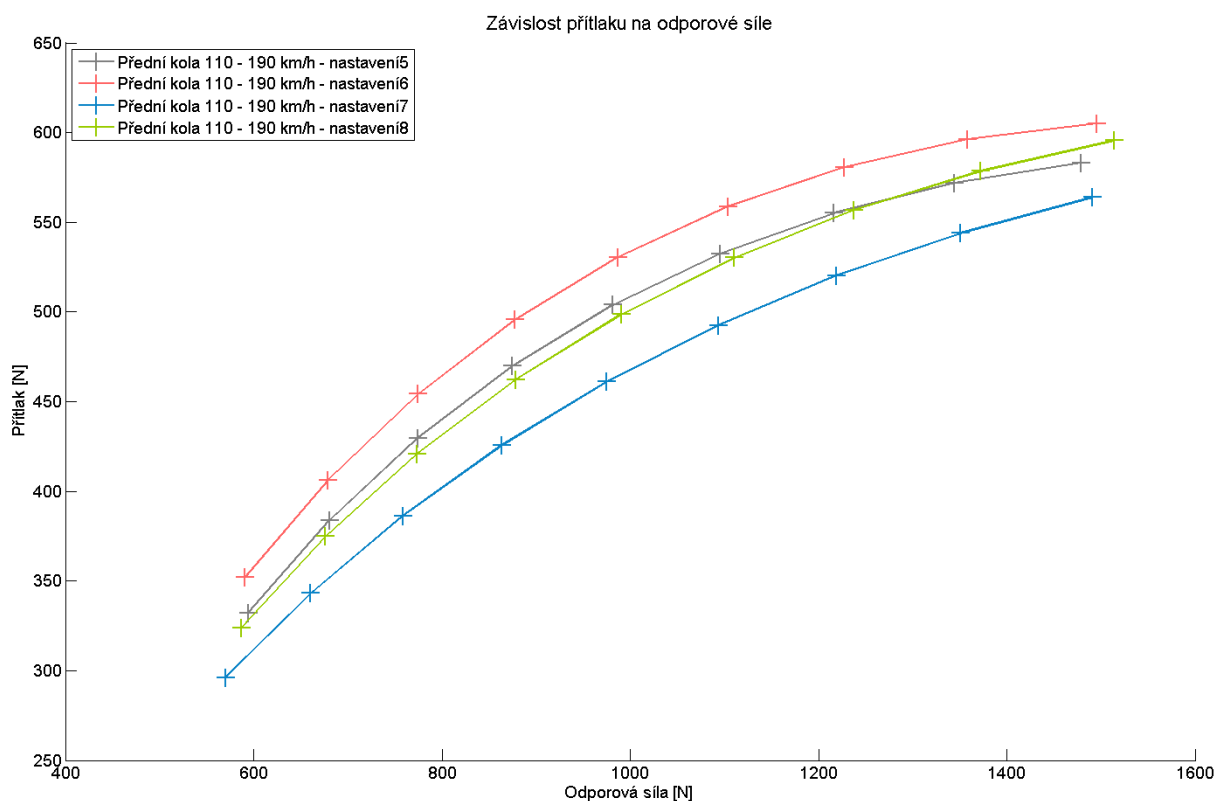
Obr. 66 Srovnání závislostí zrychlení na rychlosti z dojezdových zkoušek pro nastavení 5 - 8



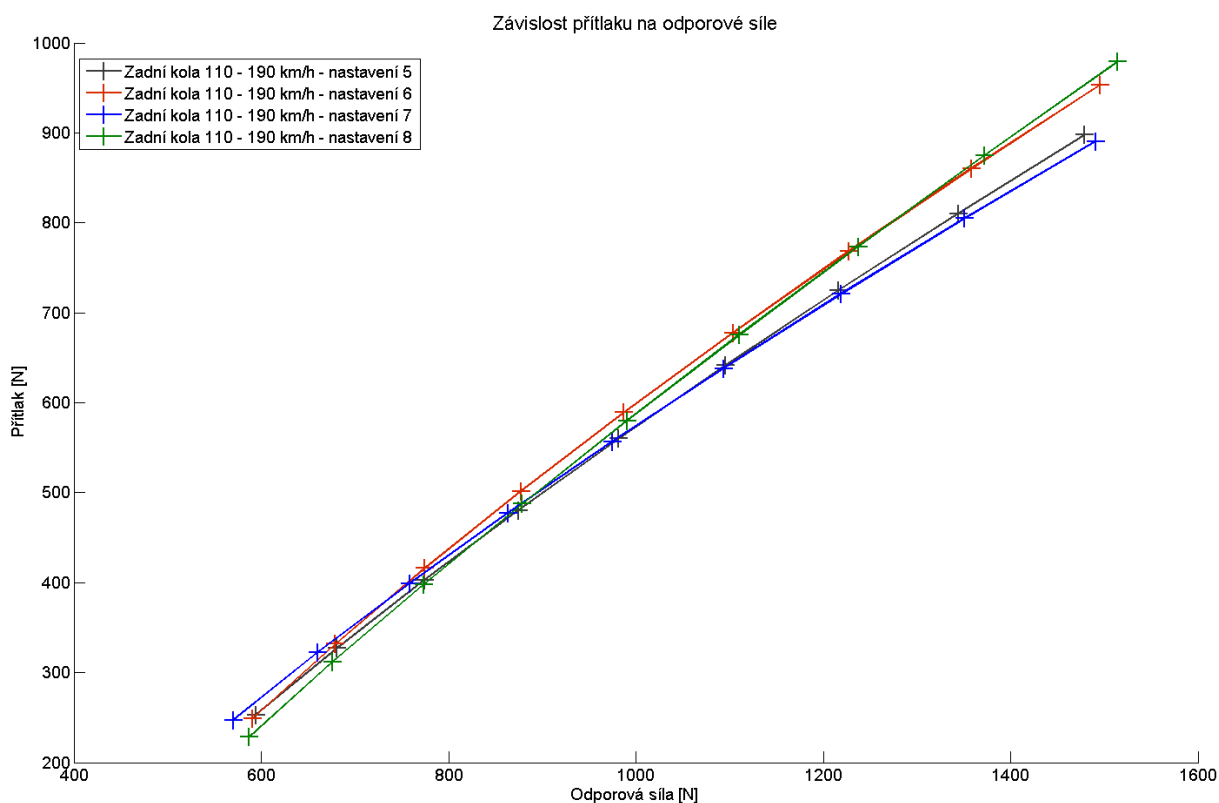
Obr. 67 Srovnání závislostí zatížení na rychlosti pro nastavení 5 - 8



Obr. 68 Závislost přtlaku na odporové síle pro nastavení 5 - 8



Obr. 69 Závislost přtlaku na odporové síle na přední nápravě pro nastavení 5 - 8



Obr. 70 Závislost přtlaku na odporové síle na zadní nápravě pro nastavení 5 - 8

Z grafu závislosti přtlaku na odporové síle pro přední nápravu je patrné, že nejvyšší přtlak a zároveň odpor generuje šesté nastavení. Páté nastavení má sice menší přtlak, avšak ve vyšších rychlostech i menší odpor. Sedmé nastavení poskytuje nejnižší přtlak a při nízkých rychlostech i nízký odpor, avšak ve vyšších rychlostech se odpor vyrovná šestému nastavení.

Z grafu závislosti přtlaku na odporové síle pro zadní nápravu je zřejmé, že páté a sedmé nastavení má podobný průběh, poskytuje nižší odpor za cenu nižšího přtlaku. Naopak šesté a osmé nastavení poskytuje zejména ve vyšších rychlostech vyšší přtlak, ale za cenu vyššího odporu.

Následují tabulky vypočtené odporové síly a přtlaku na přední a zadní nápravě pro páté až osmé nastavení.

Tab. 15 Velikost odporové síly [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
5	594	681	774	875	982	1096	1217	1344	1479
6	591	679	775	877	987	1104	1227	1358	1496
7	570	661	759	863	975	1093	1219	1351	1491
8	587	676	774	878	991	1110	1238	1372	1514

Tab. 16 Velikost přtlaku na kolo přední nápravy [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
5	332	384	430	470	504	532	555	572	583
6	352	406	454	496	531	559	581	596	605
7	296	343	386	426	461	493	520	544	564
8	324	375	421	462	499	530	557	579	596

Tab. 17 Velikost přtlaku na kolo zadní nápravy [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
5	253	327	403	480	560	641	725	810	897
6	249	332	416	502	589	678	768	860	953
7	247	322	399	477	557	638	721	805	891
8	228	312	398	487	580	675	774	875	979

Následuje tabulka koeficientů aerodynamického odporu a vztlaků.

Tab. 18 Porovnání koeficientů aerodynamického odporu a vztlaků pro jednotlivá nastavení

Nastavení	$c_x [-]$ $a = A \cdot v^2 + C$	$c_{Lf} [-]$	$c_{Lr} [-]$
5	0,713	-0,422	-0,462
6	0,729	-0,443	-0,483
7	0,743	-0,389	-0,455
8	0,745	-0,415	-0,477

Při konfrontaci průběhů závislostí přtlaku na odporové síle s hodnotami koeficientů odporu a vztlaků je zřejmé, že koeficienty vztlaku víceméně odpovídají průběhům, u koeficientu odporu však odporuje hodnota pro sedmé nastavení, které by podle grafu mělo mít nejvyšší součinitel odporu, avšak koeficient je druhý nejvyšší.

Z tohoto porovnání tedy vyplývá, že při stejné výšce přední i zadní nápravy je sice mírně redukován aerodynamický odpor, avšak dochází ke snížení přtlaku. Nejvyššího přtlaku je dosaženo při zvýšení zadní nápravy (šesté nastavení), avšak aerodynamický odpor je srovnatelný s běžným (pátým) i „terénním“ (osmým) nastavením.



7.1.3 VLIV DIFUZORU

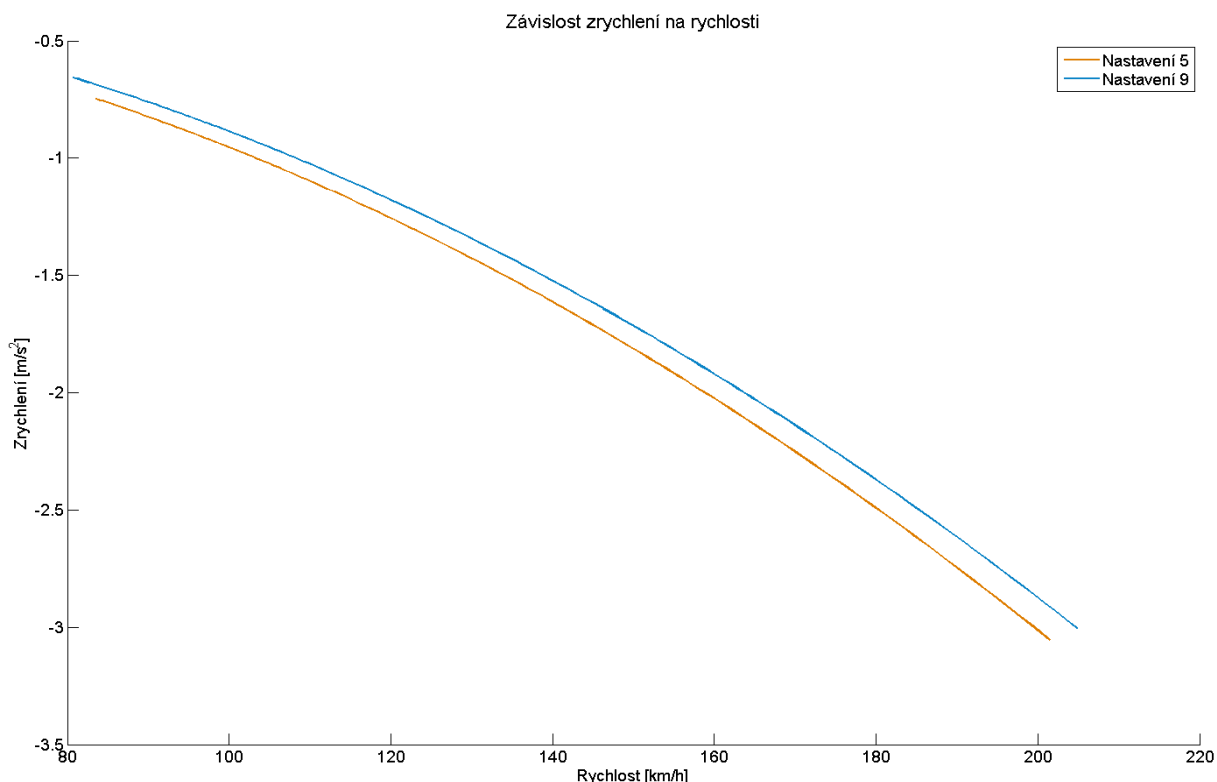
Pro zjištění vlivu difuzoru na aerodynamické vlastnosti vozidla bylo porovnáno páté a deváté nastavení. Tato nastavení mají shodnou výšku vozidla a shodné nastavení předního a zadního spoileru, liší se však tím, že při devátém nastavení byl odmontován difuzor. Hmotnost difuzoru je šest kilogramů, proto byla při tomto nastavení uvažována hmotnost vozidla o 6 kg nižší a statické zatížení kola zadní nápravy o 3 kg nižší než při ostatních nastaveních.

V následující tabulce je zobrazeno porovnání nastavení s difuzorem a bez něj.

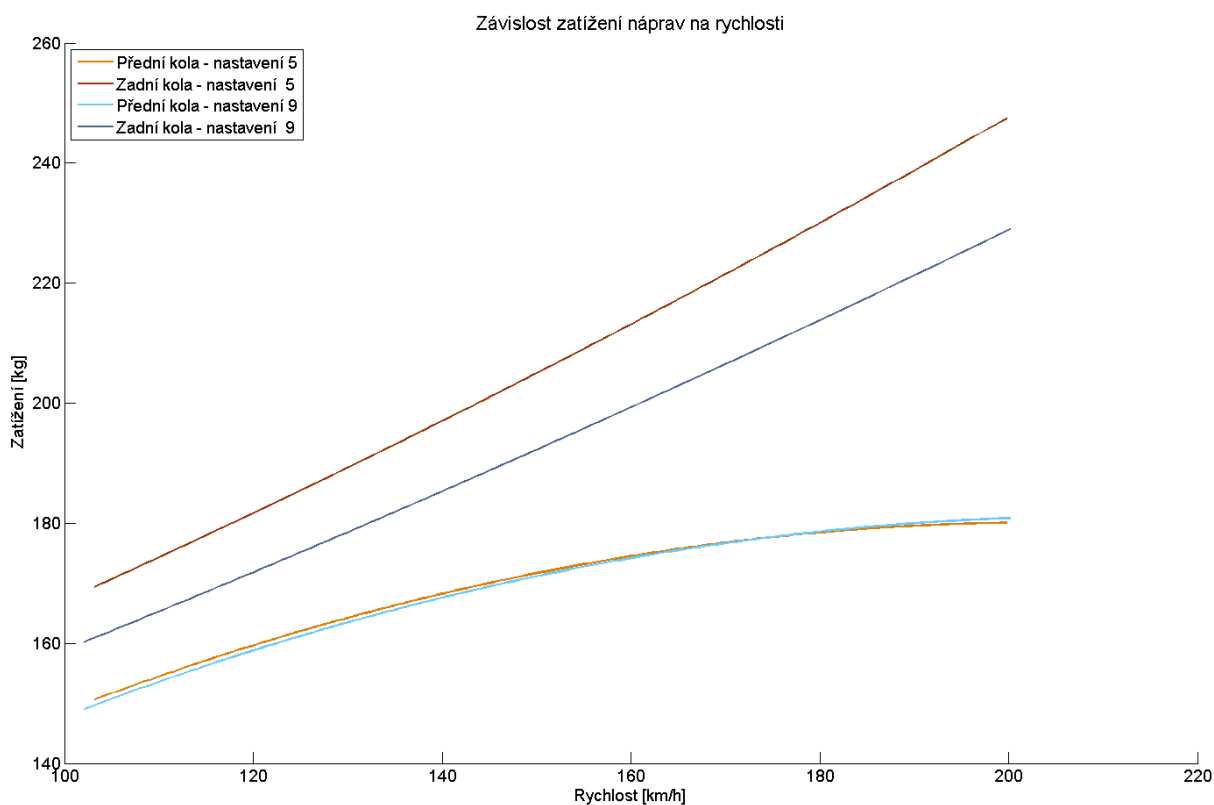
Tab. 19 Porovnání nastavení vozu s difuzorem a bez

Číslo nastavení	Výška Pn [mm]	Výška Zn [mm]	Přední spoiler [°]	Zadní spoiler	Hmotnost [kg]	Kolo zadní nápravy [kg]	Popis nastavení
5	27	38	27	6B/2A	540,5	149	S difuzorem
9	27	38	27	6B/2A	534,5	146	Bez difuzoru

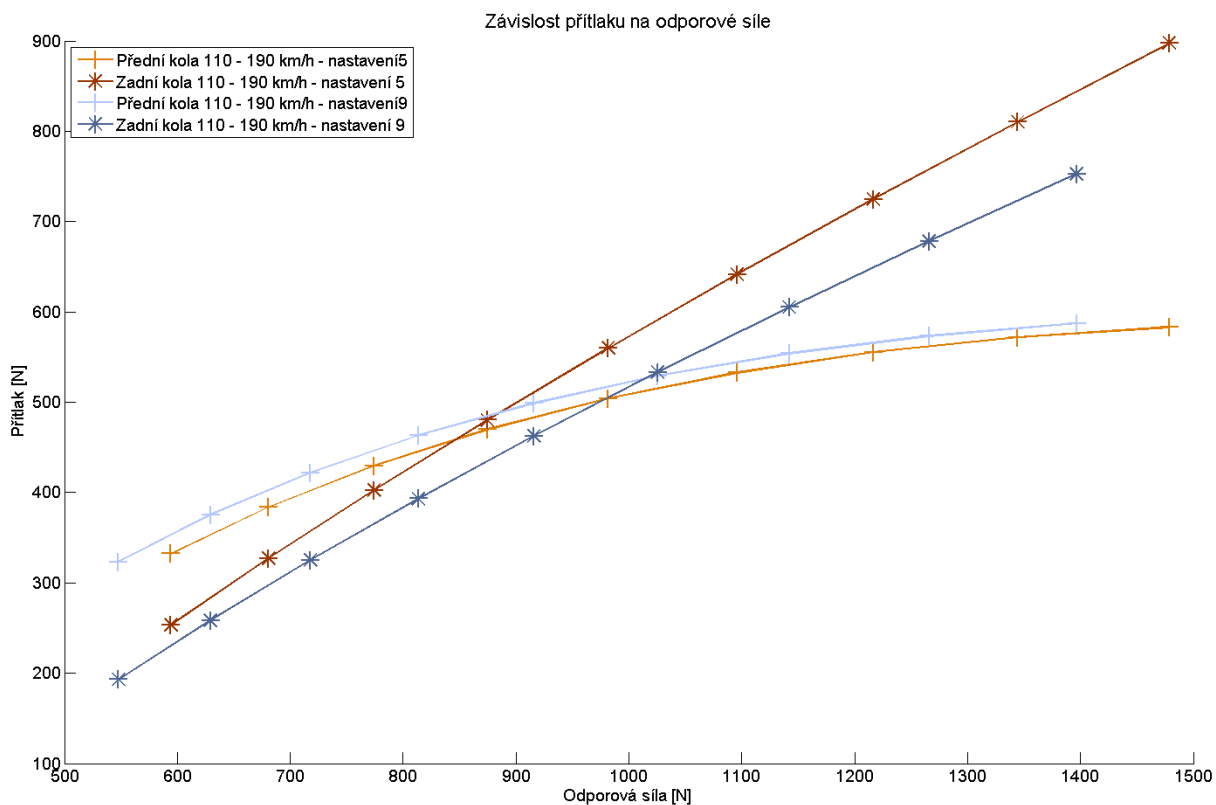
Následují grafy závislostí zrychlení na rychlosti a zatížení kol na nápravách na rychlosti a přítlaku na odporové síle.



Obr. 71 Srovnání závislostí zrychlení na rychlosti z dojezdových zkoušek pro páté a deváté nastavení



Obr. 72 Srovnání závislosti zatížení na rychlosti pro páté a deváté nastavení



Obr. 73 Závislost přtlaku na odporové síle pro páté a deváté nastavení



Ze závislosti zrychlení na rychlosti je patrné, že páté nastavení zpomaluje výrazněji, tudíž bude mít i větší odpor, což potvrzuje i graf závislosti přitlaku na odporové síle.

Z grafu závislosti zatížení na rychlosti vyplývá, že průběhy pro přední nápravu jsou si velmi podobné. Z průběhu pro zadní nápravu je patrné, že zatížení při pátém nastavení je vyšší a s rychlostí narůstá strměji.

Tab. 20 Velikost odporové síly [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
5	594	681	774	875	982	1096	1217	1344	1479
9	548	629	718	813	916	1026	1142	1266	1397

Tab. 21 Velikost přitlaku na kolo přední nápravy [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
5	332	384	430	470	504	532	555	572	583
9	323	375	422	463	499	529	554	573	587

Tab. 22 Velikost přitlaku na kolo zadní nápravy [N] pro srovnávaná nastavení

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
5	253	327	403	480	560	641	725	810	897
9	193	258	325	393	462	533	605	678	753

Z grafů závislosti přitlaku na odporové síle a tabulek hodnot přitlaku a odporu je zřejmé, že přitlak na přední nápravě difuzor nijak neovlivňuje, zvedá však aerodynamický odpor a přitlak na zadní nápravě. Rozdíl v aerodynamickém odporu při 110 km/h odpovídá zhruba pěti kilogramům, při 190 km/h pak zhruba osmi kilogramům. Rozdíl v přitlaku na zadní nápravě je při 110 km/h asi šest kilogramů a při 190 km/h zhruba patnáct kilogramů.

Tab. 23 Porovnání koeficientů aerodynamického odporu a vztlaků pro jednotlivá nastavení

Nastavení	$c_x [-]$	$a = A \cdot v^2 + C$	$c_{Lf} [-]$	$c_{Lr} [-]$
5	0,713		-0,422	-0,462
9	0,680		-0,417	-0,376

Je tedy zřejmé, že difuzor zvyšuje jak přitlak na zadní nápravě, tak aerodynamický odpor. Je však třeba podotknout, že nárůst přitlaku je vyšší než nárůst odporu. Vypočtené hodnoty koeficientů odporu a vztlaků korespondují s průběhy závislostí v grafech.



7.2 ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA PŘESNOSTI A OPAKOVATELNOSTI MĚŘENÍ

Jak již bylo v práci nejednou zmíněno, největším nedostatkem přesnosti zpracování je absence jakýchkoli informací o povětrnostních vlivech, které tím pádem nemohou být korigovány a absence podstatných informací o samotném zkušebním vozidle (čelní plocha, výška těžiště). Velkým přínosem ke zkvalitnění naměřených dat by bylo též použití přístroje měřícího relativní rychlost proudění vzduchu okolo vozidla, například Pitotovy trubice, díky kterému by bylo možné mnohem lépe vyhodnocovat jak dojezdové zkoušky, tak zkoušky za konstantní rychlosti. Při dojezdových zkouškách by u závislosti zrychlení získaného z rychlosti z kola či GPS na rychlosti z Pitotovy trubice proložené polynomem druhého stupně bylo dosaženo patrně značně věrohodnějších výsledků. To samé lze konstatovat i pro zkoušky za konstantní rychlosti, kde by bylo možné obdržet přímo závislost zatížení kola na rychlosti proudění vzduchu. Další zpřesnění by bylo možné buď provedením jízdních testů na místě splňujícím parametry normy ČSN 30 0554, nebo použitím GPS systému schopného velmi přesně, kromě pozice vozidla na trati, určit i polohu vozidla ve vertikálním směru, což by umožnilo eliminovat nepřesnosti vzniklé stoupáním či klesáním vozidla.

Samotné dojezdové zkoušky by při daném počtu jízd a způsobu provedení mohly poskytnout poměrně použitelné výsledky za předpokladu, že by, jak již bylo mnohokrát zmíněno, byly známy a do výpočtu zahrnuty velikosti rychlosti a směry větru při jednotlivých jízdách.

U zkoušek za konstantní rychlosti, kromě již mnohokrát zmiňované korekce větru, by ke zpřesnění pomohlo provedení většího počtu jízd pro více rychlostí a použití přesně vytyčeného úseku, ve kterém by se vozidlo pohybovalo požadovaným způsobem. Toto by patrně eliminovalo již zmíněné rozdílné trendy průběhů závislosti zatížení zadních kol na rychlosti pro první až páté a šesté až deváté nastavení, způsobené pravděpodobně provedením zkoušek za konstantní rychlosti pro 110 km/h a 160 km/h během jedné jízdy u šestého až devátého nastavení.

Zpracovávaná data by bylo patrně možné označit za dostačující pro jednoduché porovnávání jednotlivých nastavení (např. pro dojezdové zkoušky - porovnání jednotlivých nastavení při jízdách stejným směrem), možná i pro zpracování jaké bylo provedeno v této práci, pokud by data byla doplněna o rychlost a směr větru během jízd. Avšak v podobě, v jaké byly zpracovávány v této diplomové práci, se pro výpočty koeficientů odporu a vztlaku a celkově pro provedené zpracování nehodí - chyba měření je pro velkou část porovnávaných nastavení vozidla větší než samotné rozdíly v aerodynamických vlastnostech vozu mezi jednotlivými nastaveními.

Pro účely této práce vytvořené soubory programu Matlab (.m soubory) provádějící zpracování dat by po jednoduché úpravě byly schopny zpracovávat data z měření s Pitotovou trubicí, či data získaná z přesného měření vertikální polohy vozidla.



ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvořit metodu zpracování dat z jízdních testů za účelem vyhodnocení aerodynamických vlivů působících na vozidlo. Zpracovávaná data obsahovala data z dojezdových zkoušek a ze zkoušek za konstantní rychlosti. Nejprve byly porovnávány různé způsoby zpracování dat, pro data z dojezdových zkoušek byla zvolena metoda proložení závislosti rychlosti na čase z dat z GPS a otáčení kola polynomem čtvrtého stupně a následně symbolická derivace. Z takto zpracovaných dat pak byla vytvořena závislost zrychlení na rychlosti, která byla proložena polynomem druhého stupně. Z dojezdové zkoušky byla vytvořena i závislost zatížení na rychlosti pro kola jednotlivých náprav, která byla rovněž proložena polynomem druhého stupně. Aby tato závislost byla relevantní, bylo vypočteno přetížení přední nápravy a odlehčení zadní nápravy v důsledku zpomalení při dojezdové zkoušce, a byla provedena korekce o toto přetížení a odlehčení. Ze zkoušek za konstantní rychlosti byly též pro každé nastavení vypočteny závislosti zatížení kol jednotlivých náprav na rychlosti. Z těchto závislostí a ze závislostí zatížení na rychlosti z dojezdové zkoušky byla pro každé nastavení vytvořena závislost zatížení na rychlosti pro kolo přední a zadní nápravy. Každé nastavení tak bylo reprezentováno třemi polynomy druhého stupně - pro zrychlení na rychlosti a pro zatížení kola přední a zadní nápravy.

Dále byly vypočteny koeficienty aerodynamického odporu z kompletního polynomu závislosti zrychlení na rychlosti a z polynomu závislosti zrychlení na rychlosti bez lineárního členu, přičemž se ukázalo, že druhá jmenovaná metoda poskytuje věrohodnější výsledky.

Stejným způsobem byly vyčíslovány i koeficienty aerodynamických vztlaků, avšak v tomto případě bylo dosaženo velmi nepřesných výsledků. Proto byly koeficienty vztlaků vypočteny ještě třetí metodou, přímo ze vztahu, která se na rozdíl od předchozích dvou ukázala jako s výhradami použitelná.

Nakonec byla vypočtena odporová síla a vztlakové síly pro kolo přední a zadní nápravy, ze kterých byly vytvořeny závislosti přítlaku na odporové síle pro jednotlivá nastavení.

Následně byla porovnána nastavení vozu s rozdílným nastavením aerodynamických prvků a stejnou výškou vozidla, se stejným nastavením prvků a rozdílnou výškou vozidla a s difuzorem a bez difuzoru. Z těchto porovnání bohužel nebylo získáno mnoho výsledků a to zejména proto, že při zpracování práce nebyla k dispozici všechna potřebná data - chyběla jakákoli data o povětrnostních podmínkách panujících při provádění testů a hodnoty čelní plochy a výšky těžiště vozidla. Navíc při zpracování dat bylo nalezeno několik indicií, které naznačují, že rozložení hmotnosti vozidla během testu se nemuselo zcela shodovat s rozložením hmotnosti vozidla dodaným se zpracovávanými daty. Jedním ze závěrů srovnání jednotlivých nastavení tedy je, že chyba měření je pro velkou část prováděných porovnání větší, než rozdíl ve zjišťovaných parametrech vozu mezi jednotlivými nastaveními. Ze srovnání pro jednotlivá nastavení nicméně vyplynulo, že zvětšení úhlu předního spoileru pro jízdu na mokru má minimální vliv na přítlak na přední nápravě. Dále bylo zjištěno, že zadní dvojité křídlo generuje největší přítlak, avšak zvyšuje i aerodynamický odpor, nicméně přírůstek odporu je menší než přírůstek přítlaku. Dále bylo zjištěno, že stejné nastavení výšky vozidla pro přední i zadní nápravu sice snižuje odporovou sílu, klesá však i přítlak. Naopak nastavení s mírně vyšší zadní nápravou se jeví jako ideální - odporová síla je velmi podobná ostatním nastavením, avšak přítlak je vyšší. Posledním zjištěním bylo, že difuzor sice zvyšuje aerodynamický odpor, avšak vytvořený přítlak je zhruba dvojnásobný oproti generovanému odporu.



Byla vyvinuta metoda zpracování dat z dojezdových zkoušek a ze zkoušek za konstantní rychlosti, která však v tomto konkrétním případě nepřinesla z výše popsaných důvodů nikterak přesné výsledky. Je však nutno podotknout, že tato metoda může velmi dobře posloužit při zpracování dat z jízdních testů, které nebudou zatíženy tak velkou chybou, jako data zpracovávaná v této práci. Vzhledem k tomu, že metoda byla vytvořena na základě v této práci zpracovaných dat, pro zpracování vhodnějších dat (snímání velikosti rychlosti Pitotovou trubicí, snímání vertikální polohy vozidla) bude nutné ji mírně upravit a přizpůsobit konkrétním zpracovávaným datům. Po tomto jednoduchém přizpůsobení konkrétním datům je však pravděpodobné, že metoda bude produkovat přesné a validní výsledky.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Wikipedia [online]. 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Aerodynamika>
- [2] KATZ, J. *Race car aerodynamics*. Bentley Publishers, Cambridge, MA, 1995, 270 s. ISBN 0-8376-0142-8.
- [3] KOVANDA, B., KOVANDA, J. *Aerodynamika vozidel*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999. ISBN 80-01-01942-X.
- [4] VANČURA, J. Výpočet aerodynamiky závodního automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Porteš, Dr.
- [5] Wikipedia [online]. 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD
- [6] Wikipedia [online]. 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Turbulentn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD
- [7] Wikipedia [online]. 2014 [cit. 2014-01-28]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo
- [8] GILLESPIE, T. *Fundamentals of vehicle dynamics*. PA: Society of Automotive Engineers, Warrendale, 1992, 495 s. ISBN 15-609-1199-9.
- [9] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Nakladatelství VLK, První vydání, Brno, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [10] JOB, Š. *Experimentální měření aerodynamických silových účinků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Porteš, Dr.
- [11] Google [online]. 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/@50.2890676,13.9367782,2012a,35y,38.96t/data=!3m1!1e3>
- [12] Chabrmotorsport [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.chabrmotorsport.cz/cars.html>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$(M_Y)_0$	[Nm]	moment klonění vzhledem ke středu rozvoru náprav
$(M_Y)_{T'}$	[Nm]	moment klonění v těžišti
$\ddot{\varphi}_k$	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení kol
$\ddot{\varphi}_m$	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení rotujících částí motoru
$\ddot{\varphi}_p$	[rads ⁻²]	úhlové zrychlení rotujících částí převodovky
A	[m ²]	plocha
a, a_1, a_2	[m/s ²]	zrychlení vozidla
A, B, C	[-]	koeficienty polynomů
A_1, A_2	[-]	koeficienty polynomů
B_1, B_2	[-]	koeficienty polynomů
C_1, C_2	[-]	koeficienty polynomů
c_{Lf}	[-]	součinitel vztlaku pro přední nápravu
c_{Lr}	[-]	součinitel vztlaku pro zadní nápravu
c_{MX}	[-]	aerodynamický součinitel momentu klopení
c_{MY}	[-]	aerodynamický součinitel momentu stáčení
c_{MZ}	[-]	aerodynamický součinitel momentu klonění
c_X	[-]	aerodynamický součinitel odporu
c_Y, c_L	[-]	aerodynamický součinitel vztlaku
c_Z	[-]	aerodynamický součinitel boční síly
D_1, D_2	[-]	koeficienty polynomů
diff	[-]	numerická derivace v programu Matlab
e	[m]	vzdálenost
F_{CL}	[N]	celková vztlaková síla
F_{CX}	[N]	celková odporová síla
F_K	[N]	hnací síla potřebná k překonání jízdních odporů
f_k	[-]	součinitel valivého odporu kola
F_S	[N]	smyková síla
F_X, O_V	[N]	aerodynamická odporová síla
F_Y	[N]	boční síla
F_Z, F_L	[N]	vztlaková síla
F_{ZP}	[N]	vztlaková síla na přední nápravě
F_{Zstat}	[N]	statické zatížení kola



F_{ZZ}	[N]	vztlaková síla na zadní nápravě
G	[N]	tíha vozidla
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
GPS	[-]	Global Positioning System
h	[m]	výška těžiště
i_c	[-]	celkový převod mezi motorem a koly
i_r	[-]	převod rozvodovky
J_k	[kgm ²]	hmotnostní moment setrvačnosti kol
J_m	[kgm ²]	hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí motoru
J_p	[kgm ²]	hmotnostní moment setrvačnosti rotujících částí převodovky
l	[m]	rozvor náprav
LP	[-]	levé přední kolo
LZ	[-]	levé zadní kolo
l'_Z	[m]	vzdálenost těžiště od středů zadních kol
m	[kg]	hmotnost
M_r	[Nm]	setrvačný moment rotujících částí vozidla
M_{rk}	[Nm]	moment na kolech potřebný ke zrychlení kol vozidla
M_{rm}	[Nm]	moment na kolech potřebný ke zrychlení rotujících částí motoru
M_{rp}	[Nm]	moment na kolech potřebný ke zrychlení rotujících částí převodovky
M_X	[Nm]	moment klopení
M_Y	[Nm]	moment stáčení
M_Z	[Nm]	moment klonění
O_f	[N]	valivý odpor
O_{fK}	[N]	valivý odpor jednoho kola
O_s	[N]	odpor stoupání
O_Z	[N]	odpor zrychlení
O_{Zp}	[N]	odpor zrychlení posuvných částí
O_{Zr}	[N]	odpor zrychlení rotačních částí
p	[Pa]	tlak
p_∞	[Pa]	statický tlak
P_n	[-]	přední náprava
Pol2	[-]	Polynom druhého stupně
Pol3	[-]	Polynom třetího stupně



Pol4	[-]	Polynom čtvrtého stupně
polyder	[-]	symbolická derivace polynomu v programu Matlab
PP	[-]	pravé přední kolo
p_{tot}	[Pa]	totální tlak
PZ	[-]	pravé zadní kolo
r	[m]	rozchod kol
r_d	[m]	dynamický poloměr kola
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
RSA	[-]	Race Studio Analysis
s	[-]	sklon svahu
S	[m ²]	čelní plocha vozidla
V	[ms ⁻¹]	rychlost proudění
v	[km/h]	rychlost vozidla
V_{∞}	[ms ⁻¹]	rychlost volného proudění
W	[kg]	hmotnost vozidla
W_f	[kg]	změna zatížení kola přední nápravy vozidla
W_k	[kg]	zatížení kola nápravy
W_r	[kg]	změna zatížení kola zadní nápravy vozidla
x	[mm]	stlačení tlumiče
Xc	[mm]	celkový rozdíl ve stlačení tlumiče pro jednotlivé zkoušky
XPd	[mm]	stlačení tlumiče kola přední nápravy - dojezdová zkouška
XPk	[mm]	stlačení tlumiče kola přední nápravy - zkouška za konstantní rychlosti
XZd	[mm]	stlačení tlumiče kolazadní nápravy - dojezdová zkouška
XZk	[mm]	stlačení tlumiče kola zadní nápravy - zkouška za konstantní rychlosti
Z	[kg]	zatížení
Z_K	[N]	výslednice elementárních sil (svislá reakce od vozovky)
Zn	[-]	zadní náprava
α	[°]	úhel stoupání
β	[°]	rozdíl v naklonění vozidla mezi jednotlivými zkouškami
η	[-]	mechanická účinnost
μ	[kgm ⁻¹ s ⁻¹]	dynamická viskozita
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ	[kgm ⁻³]	hustota



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A - Tabulky koeficientů vybraných polynomů charakterizujících každé nastavení

Příloha B - Tabulky hodnot přítlaku a odporových sil



PŘÍLOHA A

Tab. 1 Tabulka celkových koeficientů polynomů závislosti zrychlení [m/s²] na rychlosti [m/s]

Nastavení	$a = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$			$a = A \cdot v^2 + C$	
	Kvadratický člen	Lineární člen	Konstanta	Kvadratický člen	Konstanta
1	-0,00107619	0,0140	-0,5188	-0,00090953	-0,2359
2	-0,00083240	-0,0084	-0,0877	-0,00094250	-0,2386
3	-0,00085396	-0,0091	-0,0883	-0,00097317	-0,2515
4	-0,00090461	-0,0060	-0,1266	-0,00098243	-0,0010
5	-0,00082034	-0,0053	-0,1720	-0,00088881	-0,2675
6	-0,00084612	-0,0048	-0,1554	-0,00090938	-0,2420
7	-0,00083067	-0,0074	-0,0522	-0,00092655	-0,1885
8	-0,00089506	-0,0026	-0,1686	-0,00092950	-0,2163
9	-0,00085258	-0,0004	-0,2163	-0,00085788	-0,2236

Tab. 2 Tabulka celkových koeficientů polynomů závislosti zatížení [kg] na rychlosti [m/s] pro kola přední nápravy

Nastavení	$W_k = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$			$W_k = A \cdot v^2 + C$	
	Kvadratický člen	Lineární člen	Konstanta	Kvadratický člen	Konstanta
1	-0,04172	4,579348	51,63681	0,011195	146,8295
2	-0,03429	4,001934	62,45225	0,012575	144,894
3	-0,03664	4,199025	57,74231	0,013518	142,7308
4	-0,04164	4,68801	46,68398	0,013878	142,6124
5	-0,03758	4,26028	59,38463	0,012692	146,5948
6	-0,04208	4,64595	53,77841	0,012701	149,1533
7	-0,0251	3,297193	73,55014	0,014047	140,5236
8	-0,03164	3,860139	65,2134	0,013517	145,0909
9	-0,03534	4,131759	60,31104	0,013519	144,6078

Tab. 3 Tabulka celkových koeficientů polynomů závislosti zatížení [kg] na rychlosti [m/s] pro kola zadní nápravy

Nastavení	$W_k = A \cdot v^2 + B \cdot v + C$			$V_k = A \cdot v^2 + C$	
	Kvadratický člen	Lineární člen	Konstanta	Kvadratický člen	Konstanta
1	0,011579	1,947444	106,002	0,034083	146,4843
2	0,025045	0,819786	128,1656	0,034646	145,0536
3	0,026885	1,017693	125,8395	0,039042	146,4377
4	0,021198	1,50701	113,6275	0,039044	144,4646
5	0,012529	1,855107	105,939	0,034419	143,914
6	0,009898	2,344828	93,01356	0,037548	141,1496
7	0,009749	2,082672	100,9746	0,03448	143,2784
8	0,019232	1,776428	99,57899	0,040015	136,3384
9	0,008419	1,818981	101,8734	0,029929	138,9845



PŘÍLOHA B

Tab. 1 Tabulka vypočtených hodnot odporové síly [N]

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	592	674	765	865	974	1092	1219	1355	1500
2	607	699	799	905	1018	1139	1266	1400	1541
3	629	725	828	937	1054	1179	1310	1448	1594
4	624	719	823	933	1052	1178	1311	1452	1601
5	594	681	774	875	982	1096	1217	1344	1479
6	591	679	775	877	987	1104	1227	1358	1496
7	570	661	759	863	975	1093	1219	1351	1491
8	587	676	774	878	991	1110	1238	1372	1514
9	548	629	718	813	916	1026	1142	1266	1397

Tab. 2 Tabulka vypočtených hodnot přtlaku na kolo přední nápravy [N]

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	314	367	413	454	488	515	536	550	559
2	315	365	410	450	484	513	537	556	569
3	306	357	403	444	478	507	531	548	560
4	298	354	404	448	485	515	540	557	569
5	332	384	430	470	504	532	555	572	583
6	352	406	454	496	531	559	581	596	605
7	296	343	386	426	461	493	520	544	564
8	324	375	421	462	499	530	557	579	596
9	323	375	422	463	499	529	554	573	587

Tab. 3 Tabulka vypočtených hodnot přtlaku na kolo zadní nápravy [N]

Nastavení / Rychlost [km/h]	110	120	130	140	150	160	170	180	190
1	273	348	424	502	582	664	748	833	920
2	276	343	414	489	568	651	737	828	922
3	330	406	486	571	659	752	848	949	1054
4	305	384	467	553	642	735	831	930	1032
5	253	327	403	480	560	641	725	810	897
6	249	332	416	502	589	678	768	860	953
7	247	322	399	477	557	638	721	805	891
8	228	312	398	487	580	675	774	875	979
9	193	258	325	393	462	533	605	678	753